



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ลักษณะเฉพาะและสมบัติทางกายภาพเคมีของกากเบียร์เพื่อการประยุกต์กระถางปลูกต้นไม้ที่ย่อยสลายได้

Characterization and Physico-Chemical Properties of Brewers' Spent Grains for Application of Degradable Plant Pot

นามผู้วิจัย นางสาวจิตวรรณ เครือคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชिरาวุฒิ เพชรเย็น, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยสิทธิ์ ทองจูง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิณุกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ลักษณะเฉพาะและสมบัติทางกายภาพเคมีของกากเบียร์เพื่อการประยุกต์กระถางปลูกต้นไม้
ที่ย่อยสลายได้

Characterization and Physico-Chemical Properties of Brewers' Spent Grains for
Application of Degradable Plant Pot

โดย

นางสาวจิตวรรณ เครือคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2555

จิตวรณ เครือคำ 2555: ลักษณะเฉพาะและสมบัติทางกายภาพเคมีของกากเบียร์เพื่อการประยุกต์
กระถางปลูกต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D. 98 หน้า

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์กากเบียร์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเบียร์ เพื่อเป็นวัตถุดิบ
ในการพัฒนาเป็นกระถางปลูกต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ โดยการดำเนินงานวิจัยจะเริ่มตั้งแต่การตรวจสอบปริมาณ
องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณโลหะหนัก สมบัติ
ทางกายภาพเคมี และหาสัดส่วนที่เหมาะสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่
สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางได้ และวิเคราะห์สมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายได้
ทางชีวภาพของกระถาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารของดินในภาวะควบคุมทั้งก่อนและหลังการ
ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถาง จากงานวิจัยพบว่า กากเบียร์ ให้ปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุด (ร้อยละ 5.629)
และมีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณโลหะหนักอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์
มาตรฐานความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อพืช จากอัตราส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไ
นัลอะซิเตทของกระถางทั้ง 16 สูตร ที่ขึ้นรูป โดยวิธีกดอัดระบบไฮโดลิก พบว่า สูตรที่มีส่วนผสมของกากเบียร์
75 กรัม ได้แก่ สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀)
สูตรที่มีส่วนผสมของกากเบียร์ 100 กรัม ได้แก่ สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12
(BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นกระถาง เมื่อทดสอบความแข็งแรงของกระถาง
พบว่า สูตรที่ 14 และสูตรที่ 10 สามารถต้านทานแรงกดสูงสุดเท่ากับ 3,235.548 และ 2,722.374 นิวตัน
ตามลำดับ และสามารถต้านทานแรงดกกระแตกในระดับความสูง 192 และ 142 เซนติเมตร ตามลำดับ คัดเลือก
กระถาง สูตรที่ 14 และสูตรที่ 10 ซึ่ง เป็นสูตรมีความแข็งแรงมาทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ ภายหลังการ
ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ ในระยะเวลา 45 วัน โดยการวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากกร
ย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนของกระถาง พบว่า ค่าการย่อยสลายของกระถางเท่ากับร้อยละ 0.0093 อย่างไรก็ตาม
สมบัติทางเคมีของดินหลังการย่อยสลายของกระถางส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วง
ระหว่างร้อยละ 0.092-0.105 อินทรีย์วัตถุเท่ากับร้อยละ 2.155-2.276 และค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.419-0.422 เด
ซิซีเมนต์ต่อเมตร จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า กากเบียร์สามารถประยุกต์นำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับกระถางปลูก
ต้นไม้ได้ แสดงให้เห็นถึง แนวทางการแก้ปัญหาวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chittawan Kruakam 2012: Characterization and Physico-Chemical Properties of Brewers' Spent Grains for Application of Degradable Plant Pot. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Lerpong Jarupan, Ph.D. 98 pages.

Brewers' spent grains (BSG) is an agro-industrial by-product from brewery production. This research aimed to utilize BSG as a raw material in the development of degradable plant pots. The experimental procedures spanned characterization of BSG including chemical composition, essential nutrients to plant growth, heavy metals, and physico-chemical properties. Optimum condition between BSG, clay, glycerol, and polyvinyl acetate (PVAc) for preparation of the plant pots in formable shape was analyzed. Chemical and mechanical properties, and biodegradability of the plant pots were investigated. Nutrient release to soil was compared at the initial and final stage of the biodegradation process. The results showed that BSG had a high nitrogen content (5.629 %) and was enriched with essential nutrients for the plant growth. Heavy metals which can cause toxicity to plants were found under maximum standard levels. After sixteen formulae for manufacturing of the plant pots by compression method, the optimum proportions between BSG, clay, glycerol and PVAc were found of having the BSG as the core content of 75 g and 100 g. Nonetheless, there were four compositions yielded a formable shape: T₁₄ (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀); T₁₆ (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀); T₁₀ (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀); and T₁₂ (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀). Analysis of mechanical properties elucidated that the BSG plant pots under T₁₄ and T₁₀ withstood the maximum compressive strength at 3,235.548 and 2,722.374 N and resisted to the drop heights at 192 and 142 cm, respectively. The biodegradability test employing cumulative carbon dioxide that was released from the organic content of the BSG plant pots showed the average biodegradation of 0.0093% after a 45-day period. In spite of such a small percentage of the biodegradation, chemical properties of soil affected by the decomposed plant pots indicated an increase of total nitrogen (0.092-0.105%), organic matters (2.155-2.276%), and electrical conductivity (EC) (0.419-0.422 ds/m). To this end, it was concluded that BSG was capable of utilizing as raw material for manufacturing the plant pots, in order to represent an alternative solution to the environmental problems generated by agro-industrial wastes.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงส์ จารุพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษางานวิจัย วางแผนงาน และแนวทางในการแก้ปัญหา ระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำที่ดี และข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิทธิ์ ทองจู อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีในทุกๆเรื่อง ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. กุณทีนิ สุวรรณกิจ ผู้ทรงวุฒิกายนอก และรองศาสตราจารย์ ดร. วาณี ชนเห็นชอบ สำหรับคำแนะนำงานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุขเกษม สิทธิพงษ์ ที่กรุณาช่วยเหลือและแก้ปัญหาเรื่องเครื่องมืออุปกรณ์ในงานวิจัยและคำแนะนำที่ดีๆ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ ทุกท่านที่ให้ความเมตตากรุณาอบรมสั่งสอนและคณาจารย์ภาควิชาปรัชญาพิพิธวิทยาเขตบางเขนและกำแพงแสนที่กรุณาเอื้ออำนวยเรื่องอุปกรณ์ ตลอดจนสถานที่การทำงานวิจัยภาคสนาม ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ เจ้าหน้าที่ภาคปรัชญาพิพิธวิทยากำแพงแสนทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาดูแลจนคอยช่วยเหลือจนการปฏิบัติงานสามารถผ่านไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ มูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์ พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว และสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2555 รหัสรายงานวิจัย พ-ท(ค) 193.55 ขอขอบพระคุณบริษัท ปทุมธานี บริเวอรี่ จำกัด ที่อนุเคราะห์กากเบียร์จากการผลิตเบียร์ และขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่อนุเคราะห์กลีเซอรอล สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และญาติ ผู้ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้ ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์และกำลังใจที่ดีสุดแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุและภาควิชาปรัชญาพิพิธวิทยาทุกท่านที่คอยช่วยเหลือตลอดมา สุดท้ายขอขอบคุณมหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่สอนให้ข้าพเจ้ามีความอดทน สู้กับปัญหา และให้เพื่อนที่ดีเป็นกำลังใจตลอดมา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านอื่นๆ ที่มีได้เอื้อนาม ณ ที่นี้ ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือในทุกๆเรื่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

จิตวรรณ เครือคำ

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบและการคำนวณค่าทดสอบ	75
ภาคผนวก ข ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ	81
ภาคผนวก ค ค่าการย่อยทางชีวภาพของกระดาษ	83
ภาคผนวก ง ค่าสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารจากการย่อยสลายทางชีวภาพ	87
ภาคผนวก จ ลักษณะของส่วนผสมและการขึ้นรูปของกระดาษจากสูตรต่างๆ	91
ภาคผนวก ฉ กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษ	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตเบียร์	7
2	เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของกากเบียร์	8
3	ปริมาณธาตุอาหารและสมบัติทางเคมี-กายภาพของกากเบียร์	10
4	สูตรส่วนผสมสำหรับกระถางจากกากเบียร์	28
5	องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหาร ปริมาณโลหะหนัก และสมบัติทางกายภาพของกากเบียร์	37
6	อัตราส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระถาง	40
7	สมบัติทางกายภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	42
8	สมบัติเชิงกลของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	44
9	ปริมาณธาตุอาหารกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	48
10	สมบัติทางเคมีของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	50
11	ปริมาณโลหะหนักของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	53
12	สมบัติของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	54
13	น้ำหนักของวัสดุตัวอย่างที่หายไปหลังจากการย่อยสลายทางชีวภาพ 45 วัน	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และ พอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	82
ค1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบไร้ชั้น วัสดุตัวอย่าง ควบคุมมาตรฐานเชิงบวก และกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	84
ค2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบไร้ชั้นวัสดุตัวอย่าง ควบคุมมาตรฐานเชิงบวก กระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	85
ค3 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	86
ง1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วันของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง	88
ง2 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง	88
ง3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง4	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง	89
ง5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณที่แตกต่างกันรอบกระถาง	90
ง6	การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง	90

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของเชื้อหุ้มเมล็ดของข้าวบาร์เลย์ตามแกนยาว	5
2	แสดงวัตถุดิบและผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเบียร์	6
3	โครงสร้างอะตอมของแร่ประกอบดินเหนียวพื้นฐาน (ก) แบบซิลิกอล ออกซิเจนเตตระไฮดรอล (ข) แบบอลูมินัม หรือแมกนีเซียมออกเตตระไฮดรอล	17
4	อุณหภูมิและชนิดของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตในแต่ละระยะของการหมัก	19
5	แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปกระถางด้วยเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (ก) แม่พิมพ์เหล็กตัวผู้ (ข) แม่พิมพ์เหล็กตัวผู้ (ค) ส่วนผสมตัวอย่างกระถาง (ง) เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก	29
6	การย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางด้วยระบบ cumulative measurement respirometric (CMR)	33
7	ลักษณะปรากฏของกากเบียร์ที่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร	38
8	ตัวอย่างของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท (ก) การขึ้นรูปกระถางที่มีโครงสร้างสมบูรณ์ (ข) กระถางหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	41
9	ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้	45
10	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างย่อยสลายทางชีวภาพ ระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท	55
11	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างการย่อยสลาย ระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14}	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ระยะเวลา 45 วัน	57
13	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินก่อนและหลังการย่อยสลาย ระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	59
14	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	60
15	การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินก่อนและหลังการย่อยสลาย ระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	61
16	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินก่อนและหลังการย่อยสลาย ระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	62
17	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	63
18	การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
จ1	กากเบียร์ (ก) ตอนเปียก (ข) ตอนแห้ง	92
จ2	ลักษณะของส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท (ก) ส่วนผสมไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (ข) ส่วนผสมสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน	92
จ3	สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางได้ (ก) สูตรที่ 2 (ข) สูตรที่ 4 (ค) สูตรที่ 6 (ง) สูตรที่ 8 (จ) สูตรที่ 9 (ฉ) สูตรที่ 11 (ช) สูตรที่ 13 (ซ) สูตรที่ 15	93
จ4	สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นกระถางได้ (ก) สูตรที่ 10 (ข) สูตรที่ 12 (ค) สูตรที่ 14 (ง) สูตรที่ 16	94
ฉ1	การย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T_{10} และ T_{14} โดยระบบ cumulative measurement respirometric (CMR)	96
ฉ2	ลักษณะของกระถางสูตรที่ 10 (ก) ก่อนการย่อยสลาย (ข) หลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน	97
ฉ3	ลักษณะของกระถางสูตรที่ 14 (ก) ก่อนการย่อยสลาย (ข) หลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน	97

ลักษณะเฉพาะและสมบัติทางกายภาพเคมีของกากเบียร์ เพื่อการประยุกต์กระถางปลูกต้นไม้ที่ย่อยสลายได้

Characterization and Physico-Chemical Properties of Brewers' Spent Grains for Application of Degradable Plant Pot

คำนำ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรในประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากในแต่ละปี สิ่งที่เกิดขึ้นตามมา คือ ปริมาณอินทรีย์วัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนมาก หากขาดการจัดการที่มีประสิทธิภาพแล้วอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ ยกตัวอย่างเช่น โรงงานอุตสาหกรรมเบียร์ซึ่งเป็นโรงงานแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งอย่างมากหลังขั้นตอนการทำแมชซิ่ง (mashing) ซึ่งจะได้อินทรีย์ของแข็งเหลือจากการกรองน้ำเวิร์ต (wort) เรียกว่า กากธัญชาติหรือกากเบียร์ (brewers' spent grain: BSG) อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณกากเบียร์ที่เหลือทิ้งคิดเป็นร้อยละ 85 ของผลพลอยได้ทั้งหมดของกระบวนการผลิตเบียร์ โดยวิธีการจัดการส่วนใหญ่ร้อยละ 95 ของปริมาณกากเบียร์ทั้งหมดจะถูกนำไปเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เนื่องจากยังคงมีปริมาณโปรตีนประมาณร้อยละ 20 และเส้นใยที่สูงถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 5 จะถูกกำจัดทิ้งเป็นของเสียและยังคงเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป (Mussatto *et al.*, 2006a; Wang *et al.*, 2001) อีกแนวทางหนึ่งที่จะสามารถจัดการอินทรีย์วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเบียร์ คือ การนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร เช่น การใช้เป็นวัสดุปรับปรุงบำรุงดิน เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน (Mbagewu and Ekwealor, 1990) การใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุปลูก (Garcia-Gomaz *et al.*, 2002) การนำมาทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ หรือทำเป็นปุ๋ยหมักร่วมกับมูลสัตว์ (Hamza, 1989; Guerra-Rodríguez *et al.*, 2000) และการนำมาเป็นวัสดุเพาะเห็ด (Wang *et al.*, 2001) เป็นต้น ซึ่งวิธีการจัดการดังกล่าวให้ผลดีในเรื่องต้นทุนต่ำเพราะราคาถูก หาได้ง่ายในท้องถิ่น พร้อมทั้งเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้งที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประโยชน์ที่ยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม จากสมบัติต่างๆของกากเบียร์ที่กล่าวข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์เป็นวัสดุที่ใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติได้เช่นกัน ซึ่งแนวความคิดเกิดจากกระแสรณรงค์การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การนำ

วัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การเลือกใช้วัสดุหรือภาชนะบรรจุที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อทดแทนการใช้พลาสติก ซึ่งผลดีที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้วัสดุเหล่านี้ก็จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาแนวทางการจัดการกากเปียกซึ่งเป็นอินทรีย์วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเปียกสู่การพัฒนากระถางต้นไม้ โดยแผนงานวิจัยนี้จะเริ่มตั้งแต่การตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณโลหะหนัก สมบัติทางกายภาพและเคมี และวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของกากเปียก ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท โดยใช้ดินเหนียวและพอลิไวนิลอะซิเตทช่วยในการยึดเกาะเพื่อขึ้นรูปเป็นกระถาง ดินเหนียวจะมีสภาพเป็นพาสติกเมื่อเปียกน้ำและจะแข็งแรงแม่เมื่อแห้ง ดินเหนียวมักที่ใช้ขึ้นรูปกระถางต้นไม้เป็นดินเหนียวบริเวณจังหวัดปทุมธานีมีสีคล้ำออกสีน้ำตาล ส่วนพอลิไวนิลอะซิเตทจะอยู่ในรูปของอิมัลชันที่เจือจางด้วยน้ำ โดยใช้เป็นสารยึดเหนี่ยว (binder) ที่ช่วยให้ความเหนียวของเนื้อดินดีขึ้น (ปรีดา, 2547) และยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและกากเปียกในขั้นตอนการขึ้นรูปกระถางให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนกลีเซอรอลจะใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะนิ่ม และยังช่วยเป็นตัวหล่อลื่นทำให้สะดวกในการถอดแบบแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความคงทนและยืดอายุการใช้งาน ช่วยป้องกันการย่อยสลายได้ดี (ประสิทธิ์ และคณะ, 2546) นอกจากนี้ยังศึกษาความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานของกระถาง โดยการทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงกดและการตกกระแทก ตลอดจนศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารของดินในภาวะควบคุมทั้งก่อนและหลังการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถาง

วัตถุประสงค์

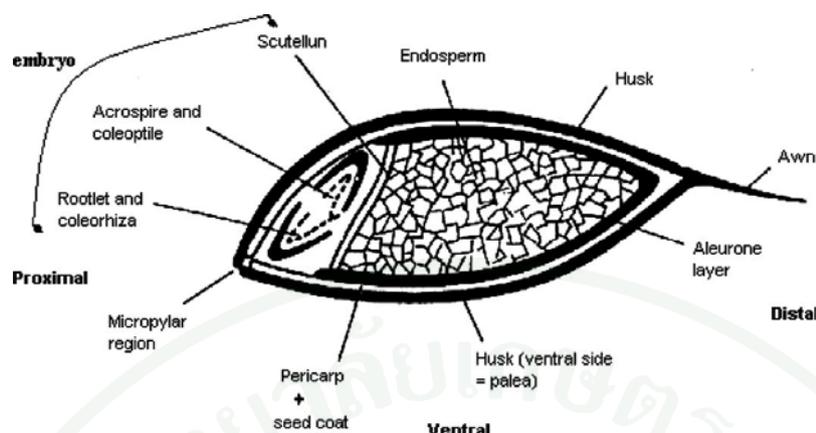
1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่สามารถขึ้นรูปได้
2. ศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท
3. ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารของดินในภาวะควบคุมทั้งก่อนและหลังการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถางจากที่เตรียมได้จากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท

การตรวจเอกสาร

1. วัตถุประสงค์และกระบวนการผลิตเบียร์

หลักในการผลิตเบียร์ในอุตสาหกรรม ได้มาจากการหมักน้ำเวิร์ตที่สกัดจากธัญชาติงอก หรือข้าวมอลต์ (malt) จากข้าวบาร์เลย์เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบหลัก ข้าวบาร์เลย์ (barley) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มักขึ้นได้ดีในภูมิภาคอากาศอบอุ่น เป็นธัญชาติที่นิยมใช้เลี้ยงสัตว์และแปรรูปเป็นข้าวมอลต์เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเบียร์ ข้าวบาร์เลย์เป็นแหล่งโปรตีนและสตาร์ช (starch) ข้าวมอลต์ที่นิยมใช้ทำมอลต์เป็นชนิดที่มีเปลือกหุ้มมี 2 ชนิด คือ ชนิดแรกที่มีรวง 2 แถว และชนิดที่สองมีรวง 6 แถว ลักษณะภายในของข้าวบาร์เลย์ที่มีเปลือกหุ้มจะประกอบด้วยเปลือกนอก (hull) ร้อยละ 13 ของเมล็ด ความหนาของเปลือกจะขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ ขนาดของเมล็ด และการจัดเรียงตัวของเมล็ด เมล็ดข้าวบาร์เลย์ประกอบด้วยเปลือกหุ้มเมล็ด (tests) เยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone) เนื้อเมล็ด (endosperm) คัพภะ (embryo) และใบเลี้ยงอ่อน (scutellum) น้ำหนักเมล็ดเฉลี่ย 34 มิลลิกรัม มีความยาวของเมล็ด 6.0-12.0 มิลลิเมตร มีความกว้างระหว่าง 2.7-5.0 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.8-4.5 มิลลิเมตร องค์ประกอบทางเคมีของข้าวบาร์เลย์ ประกอบด้วยสตาร์ชร้อยละ 63-65 น้ำตาลซูโครส ร้อยละ 1-2 น้ำตาลอื่นๆ ร้อยละ 1 กัมที่ละลายได้ร้อยละ 1.5 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 8-10 ไขมันร้อยละ 2-3 โปรตีนร้อยละ 8-13 และเถ้าร้อยละ 2-2.5 ในสตาร์ชประกอบด้วยอะมิโลสในสัดส่วนร้อยละ 24 นอกจากนี้จะพบน้ำตาลซูโครสมากในคัพภะและชั้นของเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด สำหรับเปลือกจะมีเซลลูโลสมาก แต่ผนังเซลล์ของเมล็ดสตาร์ชจะไม่ได้ประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 1 (อรอนงค์, 2532)

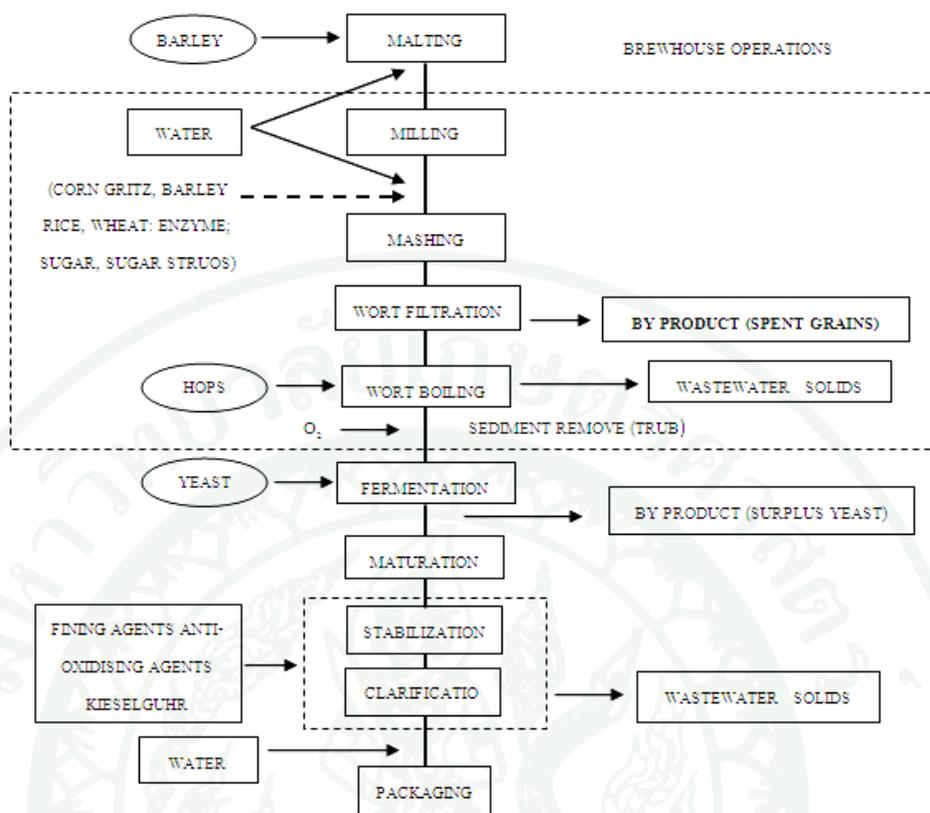
ปัจจุบันมีการผสมธัญพืชอื่นๆกับข้าวมอลต์เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า และข้าวสาลี เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากข้าวมอลต์มีราคาสูง โดยในกระบวนการหมักนี้จะใช้ยีสต์ (yeast) สกุล *Saccharomyces* ซึ่งมีบทบาทในการเปลี่ยนน้ำตาลในน้ำเวิร์ตให้เป็นเอทานอลและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังผลิตสารอื่นๆ ทั้งที่ระเหยได้และระเหยไม่ได้หลายชนิด ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ให้กลิ่นรสของเบียร์ ทำให้เบียร์ที่ผลิตได้มีความหลากหลายซึ่งขึ้นอยู่กับสีและรสชาติ (Boulton and Quain, 2006; Oreopoulou and Russ, 2007)



ภาพที่ 1 ลักษณะของเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวบาร์เลย์ตามแกนยาว

ที่มา: Mussatto *et al.* (2006a)

กระบวนการผลิตเบียร์มีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเริ่มจากการผลิตข้าวมอลต์ (malting) โดยการนำข้าวบาร์เลย์มาแช่ (steeping) ที่อุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้ให้งอก (germination) ที่อุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4-7 วัน ข้าวมอลต์ที่ได้จะมีเอนไซม์พวกแอลฟาอะไมเลสและโปรติเอส จากนั้นนำข้าวมอลต์เข้าสู่ขั้นตอนการผสมซึ่ง (mashing) โดยการนำข้าวมอลต์มาบดและแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60-75 องศาเซลเซียสเพื่อแยกกรดอะมิโนเพปไทด์และน้ำตาลที่เกิดระหว่างการผลิตมอลต์ออกมา นอกจากนี้ยังเป็นการย่อยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่เหลืออยู่ให้เป็นกรดอะมิโนและน้ำตาลเพิ่มขึ้นโดยเอนไซม์ที่อยู่ในข้าวมอลต์ ในระหว่างขั้นตอนนี้อาจมีการเติมธัญพืชอื่นๆลงไปเพื่อเพิ่มคาร์โบไฮเดรต เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี ข้าวโพดหรือข้าวเป็นต้น หลังจากย่อยเสร็จสมบูรณ์แล้ว กรองของเหลวที่สกัดได้จากข้าวมอลต์ซึ่งเรียกว่า น้ำเวิร์ต ออกมา โดยใช้ถังหมัก lauter tun กรองของแข็งแยกออกจากน้ำเวิร์ตซึ่งเรียกว่า กากธัญชาติหรือกากเบียร์ (brewers' spent grains; BSG) น้ำเวิร์ตที่แยกออกจากกากเบียร์ได้นำไปต้มกับฮอปเพื่อเป็นการฆ่าเชื้อและทำลายเอนไซม์อะไมเลสและเอนไซม์อื่นๆและเพื่อตกตะกอนโปรตีน น้ำเวิร์ตที่ต้มแล้วจะถูกแยกฮอปและโปรตีนออกโดยการกรองหรือการเหวี่ยงตกตะกอน จากนั้นน้ำเวิร์ตที่ผ่านการต้มและทำให้เย็นลงจะถูกนำไปหมักเบียร์ด้วยเชื้อยีสต์ เพื่อทำการหมักให้เกิดแอลกอฮอล์ หลังจากกระบวนการหมักสิ้นสุดได้ที่แล้ว จึงทำการกรองชั้นของยีสต์ที่ผิวหน้าออกมา นำน้ำเบียร์ที่ได้มาต้มไว้ในถังพักที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นกรองให้ใสแล้วเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสมก่อนการบรรจุขวด (อรอนงค์, 2532; คุณณี, 2538)



ภาพที่ 2 แสดงวัตถุดิบและผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเบียร์

ที่มา: Oreopoulou and Russ (2007)

แม้ว่าในอุตสาหกรรมเบียร์จะก่อให้เกิดผลพลอยได้และวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ได้แก่ กากเบียร์ กากฮอป และกากยีสต์ แต่กากเบียร์ถือเป็นผลพลอยได้หลักของอุตสาหกรรมเบียร์ ประมาณร้อยละ 85 ของผลพลอยได้ทั้งหมดจากกระบวนการผลิตเบียร์ (Mussatto *et al.*, 2006a) กากเบียร์เป็นของแข็งที่ได้หลังจากการกรองน้ำเวิร์ตออกไปแล้ว ส่วนกากฮอปเป็นกากที่ได้จากการกรองหลังการต้มฮอปกับน้ำเวิร์ต ซึ่งมีส่วนของโปรตีนที่ตกตะกอนจากน้ำเวิร์ตในระหว่างการต้ม ส่วนกากยีสต์เป็นส่วนที่กรองออกจากเบียร์หลังจากระบวนการหมักสิ้นสุด ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว ยังคงมีคุณค่าทางอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงมักถูกนำไปเป็นอาหารสัตว์หรือใช้ทำปุ๋ย (ศิริวัลย์, 2530)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตเบียร์

วัตถุดิบและ ผลพลอยได้	ความชื้น (ร้อยละ)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เส้นใย (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	สกัดปราศจาก ไนโตรเจน (ร้อยละ)
กากเบียร์	7.2-7.7	21.1-27.5	6.4-6.9	15.3-17.6	3.9-4.2	39.4-42.9
กากฮอป	6.2	23.0	3.6	24.5	5.3	37.4
กากยีสต์	4.3	50.0	0.5	0.5	10.0	34.7

ที่มา: คัดแปลงจาก อรอนงค์ (2532)

2. ลักษณะของกากเบียร์และการนำไปใช้ประโยชน์

ลักษณะของกากเบียร์ประกอบด้วยเปลือก เปลือกชั้นนอก เปลือกหุ้มเมล็ดที่ห่อหุ้มเมล็ดของข้าวบาร์เลย์ เนื้อเมล็ดที่เหลือจากกระบวนการผลิตมอลต์และเชื้อหุ้มเมล็ด ซึ่งกากเบียร์เป็นวัสดุลินโนเซลลูโลซิก (lignocellulosic) ที่มีองค์ประกอบเซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 17 พอลิแซคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulose polysaccharide) ร้อยละ 28 และลิกนิน (lignin) ร้อยละ 28 นอกจากนี้กากเบียร์ยังประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 20 และเส้นใยที่สูงร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้งขององค์ประกอบ (Mussatto *et al.*, 2006a)

กากเบียร์มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ของข้าวบาร์เลย์ ระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยว สมบัติของดอกฮอปและรสชาติที่เติมลงไปในการบวนการผลิตเบียร์ นอกจากนี้วิธีการรักษากากเบียร์ที่ภาวะแตกต่างกันก็มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีด้วย หากเก็บกากเบียร์ในภาวะแห้งด้วยวิธีการอบแห้ง (oven drying) และวิธีการระเหิดแห้ง (freeze-drying) จะทำให้ปริมาณโปรตีนและไขมันในกากเบียร์น้อยกว่าการเก็บโดยวิธีการแช่เยือกแข็ง (frozen) อย่างไรก็ตามกรรมวิธีการอบแห้งเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมเนื่องจากใช้ต้นทุนต่ำ (Santos *et al.*, 2003) นอกจากนี้ในการผลิตเบียร์แต่ละโรงงานยังมีสูตรการผลิตเบียร์ที่แตกต่างกัน โดยแต่โรงงานอาจเติมธัญพืชอื่นๆลงไป เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตและเพื่อปรับปรุงกลิ่นรสเฉพาะของเบียร์ สัดส่วนที่ใช้จะมีความแตกต่างตามสูตรการผลิตเบียร์แต่ละยี่ห้อ โดยทั่วไปมักเติมธัญพืชอื่น ๆ สมประมาณร้อยละ 30 ของวัตถุดิบธัญพืชทั้งหมด ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของกากเบียร์ที่ได้จากแต่ละโรงงานจึงมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 (กาญจนา, 2549)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของกากเบียร์

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	กากเบียร์แต่ละโรงงาน	
	โรงเบียร์ไทย-เยอรมัน ¹	บริษัท อาหารเสริม จำกัด ²
ความชื้น	6.21	5.91**
โปรตีน	19.26	30.37
ไขมัน	4.31	8.58
เส้นใยหยาบ	44.33*	17.00
เถ้า	3.81	-
คาร์โบไฮเดรต	22.96	-

หมายเหตุ * ปริมาณเส้นใยทั้งหมด (total dietary fiber) ** ร้อยละโดยน้ำหนักสด

ที่มา: ¹ จิตวรรณ และ ศิริลักษณ์ (2547); ² กาญจนา (2549)

จากลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของกากเบียร์ถือได้ว่าเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง ซึ่งวิธีการจัดการส่วนใหญ่ร้อยละ 95 ของปริมาณกากธัญชาติทั้งหมดจะนำไปเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ แต่ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 5 จะถูกกำจัดทิ้งเป็นของเสียยังคงเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม (Mussatto *et al.*, 2006a; Wang *et al.*, 2001) นอกจากการนำกากเบียร์ไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของส่วนผสมในอาหารสัตว์แล้ว กากเบียร์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารให้กับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ได้ โดยใช้แทนแป้งรำในขนมปังโฮลวีทด้วยกากเบียร์ (จิตวรรณ และ ศิริลักษณ์, 2547) อีกทั้งยังมีการนำกากเบียร์สกัดเป็นแป้งโปรตีนโปรตีนคอนเซนเทรต และ โปรตีนไอโซเลท เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมกับอาหารได้โดยตรง (กาญจนา, 2549) นอกจากนี้กากเบียร์สามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมการทำอิฐบล็อก (Russ *et al.*, 2005) สามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นกระดาษ (Mussatto *et al.*, 2006b) ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นผลิตกรดแลคติก เพื่อผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) (Mussatto *et al.*, 2007) และใช้เป็นวัสดุการเพาะเลี้ยงเห็ด (Wang *et al.*, 2001) เป็นต้น

นอกจากองค์ประกอบหลักของกากเบียร์ซึ่งเป็นอินทรีย์วัสดุแล้วนั้น กากเบียร์ก็ยังสามารถนำมาเป็นวัสดุปรับปรุงดินและให้ธาตุอาหารกับดินได้ด้วยดังงานวิจัยของ Mbagwu และ Ekwealor (1990) ที่ศึกษาการปรับปรุงเนื้อดินเหนียวปนทรายด้วยการนำกากเบียร์มาเป็นส่วนผสมพบว่า การใช้กากเบียร์ในสัดส่วนร้อยละ 10 ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของ

ดินผสมดังกล่าว โดยสามารถเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้แก่ดินได้มากกว่าร้อยละ 70 ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์และอุ้มน้ำได้ดีขึ้น และมีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นกรด-ด่างของดิน นอกจากนี้กากเบียร์ยังมีปริมาณธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (ดังแสดงในตารางที่ 3) และยังเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำคือ 21.5:1 ส่งผลให้สามารถย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมมักอยู่ในช่วงประมาณ 20:1 ถึง 30:1 ในการย่อยอินทรีย์วัตถุ จุลินทรีย์จะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเพื่อให้ได้พลังงานและธาตุจากอินทรีย์วัตถุไปสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะเป็นปัจจัยที่ควบคุมปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ ความสามารถในการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ และการปลดปล่อยของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน หากมีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมดต่ำกว่า 20:1 การย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ง่าย และจะมีปริมาณไนโตรเจนเหลือปลดปล่อยออกมาสู่สภาพแวดล้อมในรูปของแอมโมเนียมโดยกระบวนการมิเนอราไลเซชัน (mineralization) ในทางตรงกันข้าม หากค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่า 30:1 การย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าแม้ว่าจะมีคาร์บอนใช้ในการเจริญเติบโตจุลินทรีย์มากกว่าก็ตาม แต่มีไนโตรเจนอย่างจำกัด จุลินทรีย์ก็มักจะดึงไนโตรเจนในดินในรูปของแอมโมเนียมหรือไนเตรทไปใช้ในกระบวนการที่เรียกว่า อิมโมบิไลเซชัน (immobilization) ทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชในดินลดลง จนอาจทำให้พืชเกิดการขาดธาตุไนโตรเจนได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุอาหารและสมบัติทางเคมี-กายภาพของกากเป็ยร์

ปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ	กากเป็ยร์
ไนโตรเจน (ร้อยละ)	5.10
ฟอสฟอรัส* (ร้อยละ)	0.40
โพแทสเซียม (ร้อยละ)	3.40
แคลเซียม (ร้อยละ)	0.40
แมกนีเซียม (ร้อยละ)	0.48
อินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ)	21.0
อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	86.27
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	21.50
อัตราส่วนคาร์บอนต่อฟอสฟอรัส	52.50
อัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส	12.80
ความเป็นกรด-ด่าง	4.40
ความจุในการอุ้มน้ำ (0.01 เมกะปาสคาล) (ร้อยละ)	330

หมายเหตุ * Available P คือ ปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่พืชสามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้

ที่มา: คัดแปลงจาก Mbagwu and Ekwealor (1990); Guerra-Rodríguez *et al.* (2000)

นอกจากการศึกษาปริมาณธาตุอาหารที่สะสมอยู่ในกากเป็ยร์แล้ว การนำกากเป็ยร์มาประยุกต์ใช้ในการผลิตปุ๋ยหมักก็สามารถสร้างมูลค่าให้กับอินทรีย์วัสดุชนิดนี้ได้เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Guerra-Rodríguez *et al.* (2000) ซึ่งศึกษาการเตรียมปุ๋ยหมักโดยกระบวนการหมักร่วม (co-composting) ระหว่างเศษเหลือทิ้งของข้าวบาร์เลย์จากกระบวนการเตรียมข้าวมอลท์ จำนวน 24 กิโลกรัมและมูลสัตว์ปีกแห้ง 8 กิโลกรัม ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักแบบใช้ออกซิเจนเท่ากับ 103 วัน กองปุ๋ยหมักจะถูกกลับกองเมื่อมีอุณหภูมิภายในเกินกว่า 60 องศาเซลเซียสเพื่อช่วยให้กองปุ๋ยหมักมีความร้อนกระจายสม่ำเสมอและเป็นการช่วยเพิ่มอากาศให้กับปุ๋ยหมัก ส่งผลให้อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 12 วันแรก แสดงพฤติกรรมของจุลินทรีย์ย่อยสลายกองปุ๋ยหมักในอัตราที่รวดเร็ว หลังจากวันที่ 19-20 แล้ว อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักจะลดลงเหลือประมาณ 20 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแปรสภาพได้ที่แล้ว หลังจากการหมัก 130 วัน พบว่า ปุ๋ยหมักมีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 8.72 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 13:1 จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้

Garcia Gomez *et al.* (2002) ศึกษาการใช้ปุ๋ยหมักที่มาจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการต้มเบียร์เพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก (growing media) สำหรับพืชไม้ประดับในกระถางทดแทนการใช้พีท (peat) โดยการผสมกากยีสต์และกากมอลต์ร้อยละ 25 ร่วมกับกึ่งดินมะนาวร้อยละ 97.5 โดยน้ำหนักแห้ง แล้วหมักด้วยระบบรูทเกอร์ (rutgers) โดยวิธีการรวมกันในที่ที่มีอากาศพร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิหมักเป็นเวลา 90 วัน เมื่อปุ๋ยหมักแปรสภาพ จึงนำผสมกับพีทในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า วัสดุปลูกที่มีสัดส่วนของปุ๋ยหมักต่อพีทคือ 1:3 ให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อใช้ปลูกพืชชนิดที่ทนต่อความเค็ม สำหรับพันธุ์พืชที่ไม่ทนต่อความเค็มจะเหมาะสมกับวัสดุปลูกที่มีสัดส่วนของปุ๋ยต่อพีทคือ 1:1 โดยปุ๋ยหมักที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุปลูกต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและพืชสามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่มีโรค ปราศจากวัชพืช ปุ๋ยหมักยังสามารถให้ธาตุอาหารหลักในโตรเจนและโพแทสเซียม ที่แสดงการปลดปล่อยความเป็นปุ๋ยอินทรีย์ออกมาอย่างช้าๆ สิ่งที่ต้องคำนึงในการใช้วัสดุปลูกพีทเหล่านี้คือชนิดของพืช และค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ซึ่งจะแสดงปริมาณเกลือที่แทรกด้วยในเนื้อปุ๋ยซึ่งจัดเป็นขีดจำกัดของวัสดุปลูก และแสดงถึงไอออนลบเช่น คลอไรด์ที่อาจมีผลต่อความเป็นพิษกับพืช นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้ามีปริมาณเกลือมากเกินไปจะส่งผลต่อแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) บริเวณรากพืชซึ่งจะยับยั้งการดูดน้ำของพืช และยังมีผลต่อการสังเคราะห์ธาตุอาหาร ฟอสฟอรัส โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม เป็นต้น (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

ในขณะที่งานวิจัยของ Montemurro *et al.* (2009) เป็นงานวิจัยที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในกองปุ๋ยหมักเกิดจากการผลิตแอมโมเนียของกระบวนการแอมโมไฟเคชัน และกระบวนการมิเนอไรเซชัน (mineralization) ของไนโตรเจนอินทรีย์ โดยพฤติกรรมของจุลินทรีย์แสดงถึงการละลายของแอมโมเนียที่ถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดระหว่างกระบวนการหมักมีปริมาณลดลง ทำให้สัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนในกองปุ๋ยหมักลดลง อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นก็จะไปมีผลต่อการทำลายเมล็ดวัชพืชและไข่แมลง แม้แต่เชื้อโรคต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเชื้อโรคของคนหรือเชื้อโรคพืชก็ถูกทำลายเช่นกัน

นอกจากประโยชน์ที่ได้รับจากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจะก่อประโยชน์ทางด้านการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นวัสดุปลูก ใช้ทำปุ๋ยหมัก หรือนำมาใช้เป็นปรับปรุงดินที่สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ แต่สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่กับการใช้งานคือ ปริมาณโลหะหนัก (heavy metals) ที่หลงเหลือในวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังใน

งานวิจัยของ Guerra-Rodríguez *et al.* (2000) กล่าวว่า ปุ๋ยหมักจากเศษเหลือทิ้งของข้าวบาร์เลย์และ มูลสัตว์ปีกแห้งที่ผ่านกระบวนการหมักรวมแปรสภาพแล้ว มีปริมาณธาตุโลหะหนักสังกะสี (Zn) 883 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แคดเมียม (Cd) 0.30-0.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว (Pb) 3.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทองแดง (Cu) 284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยหมักตามข้อกำหนดของประเทศสเปน ซึ่งระบุว่าปริมาณสังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว และทองแดงไม่เกิน 1100, 10, 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

3. การขึ้นรูปภาชนะบรรจุจากวัสดุธรรมชาติและการปรับปรุงสมบัติเชิงกล

งามทิพย์ และ สายสนม (2540) ศึกษาการขึ้นรูปภาชนะบรรจุจากแป้งมันสำปะหลัง โดยพัฒนาสูตรแป้งผสมที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งสอ (แป้งที่ได้มาจากการนำหัวมันสดมาบด) พลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) สารยึดเหนี่ยว (binder) และสารเพิ่มความแข็งแรง (filler) ที่มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อน เครื่องขึ้นรูปต้นแบบทำงานโดยระบบไฮดรอลิก มีแม่พิมพ์พร้อมแผ่นความร้อนฝังในแม่พิมพ์ สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 300 องศาเซลเซียส แม่พิมพ์ต้นแบบมีรูปร่างเป็นถ้วยทรงกลม ขนาดมิติภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 11.50 เซนติเมตร ด้านล่าง 6.50 เซนติเมตร ความสูง 5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียเท่ากับ 3 มิลลิเมตร มีช่องทางระบายอากาศขนาด 3 มิลลิเมตร ทั้งหมด 8 ช่องทาง จากการศึกษาพบว่า ภาชนะบรรจุสามารถขึ้นรูปได้โดยให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ 180 องศาเซลเซียส และแม่พิมพ์ตัวเมีย 200 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 นาที สมบัติของภาชนะบรรจุที่ได้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.150-0.176 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพลังงานดึงกระแทก (tensile impact energy) อยู่ในช่วง 0.01-0.03 จูล ความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำมีค่ามากกว่า 1800 วินาที แต่ความทนทานต่อน้ำยังมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากภาชนะตัวอย่างมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และมีรอยต่อระหว่างฐานกับผนังของถ้วยหักมุมมากเกินไปจนทำให้เกิดการรั่ว อย่างไรก็ตามถ้วยที่สมบูรณ์จะสามารถทนทานต่อน้ำได้ตั้งแต่ 20 นาทีถึง 75 นาที

วงศ์พกา และ ปาริชาติ (2542) ได้นำเชื้อผักตบชวาขึ้นมาขึ้นรูปเป็นภาชนะรูปถาดผลไม้ โดยใช้ กาวแป้งเปียกเป็นสารยึดเหนี่ยว มีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำเท่ากับ 1:1 โดยผสมกาวแป้งเปียกกับเชื้อผักตบชวาปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้งของเชื้อ แล้วขึ้นรูปภาชนะด้วยแม่พิมพ์พลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีนสไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene) โดยการกดทับแม่พิมพ์ตัวผู้กับตัวเมียให้ประกบกัน จากนั้นนำแม่พิมพ์ทั้งสองเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่า ได้ภาชนะรูปถาดมีการหดตัวสูง เนื่องจากแม่พิมพ์ไม่สามารถระบายความ

ร้อนและนำความร้อนได้ดี ทำให้บริเวณด้านรอบๆของแม่พิมพ์แห้งเร็วกว่าบริเวณด้านในของแม่พิมพ์ จึงทำให้เกิดการโค้งงอขึ้นในด้านที่แห้งเร็วกว่า ซึ่งการเพิ่มแรงกดร่วมกับการให้ความร้อนขณะกดอัดจะช่วยลดการหดตัวและการบิดเบี้ยวของภาชนะบรรจุขึ้นรูปได้

ธรรมรักษ์ และ อนันต์ (2542) ศึกษาการผลิตภาชนะบรรจุขึ้นรูปจากเชื้อเปลือกข้าวโพดด้วยเครื่องอัดร้อนแบบนิวเมติก โดยใช้กาวแป้งเปียกจากแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเหนี่ยวซึ่งมีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำเท่ากับ 1:1 โดยผสมกาวแป้งเปียกร้อยละ 30 ของน้ำหนักเชื้อเปลือกข้าวโพดแห้งและขึ้นรูปภาชนะบรรจุโดยใช้แม่พิมพ์อะลูมิเนียมที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้แม่พิมพ์ตัวผู้อัดด้วยความดัน 2 บาร์ เป็นเวลา 45 นาที ซึ่งเป็นภาวะที่สามารถขึ้นรูปภาชนะบรรจุได้อย่างเหมาะสม ไม่เกิดการบิดงอ แต่ภาชนะที่ได้จะมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากส่วนผสมและสารยึดเหนี่ยวกระจายตัวได้ไม่ดีและมีอากาศที่แทรกอยู่ในเนื้อของส่วนผสม

ลินชัย (2543) ศึกษาการผลิตต้นแบบภาชนะบรรจุอาหารจากเชื้อตะไคร้หอม ที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสม เพื่อช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีและเหนียวนุ่ม สารยึดเหนี่ยวใช้เป็นกาวแป้งเปียก (แป้งมันสำปะหลังต่อน้ำเท่ากับ 1:1) ผสมปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นภาชนะด้วยแม่พิมพ์อะลูมิเนียมที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วอัดร้อนด้วยเครื่องนิวเมติกที่ความดัน 2 บาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า การเติมพลาสติกไซเซอรช่วยให้กาวแป้งเปียกและเส้นใยเข้ากันได้ดี ภาชนะบรรจุไม่ติดแม่พิมพ์ รูปร่างไม่บิดงอ ไม่มีรอยแตก ผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม การเติมพลาสติกไซเซอรจะมีผลให้ภาชนะค่าความชื้นสูงกว่าภาชนะบรรจุที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร

ภัสสร (2543) ปรับปรุงคุณสมบัติของภาชนะบรรจุขึ้นรูปโดยใช้แป้งคัดแปรชนิดสตาร์ชอะซีเตทที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำแทนแป้งมันสำปะหลัง และผสมปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอาหารที่มีปริมาณเส้นใยสูงได้แก่ กากมะพร้าว กากถั่วเหลือง และคัพพะของข้าวโพด พบว่าการใช้แป้งคัดแปรแทนแป้งมันสำปะหลังจากสูตรพื้นฐาน (แป้งมันสำปะหลัง สารเติมแต่ง น้ำ) ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าช่วยให้ภาชนะบรรจุมีสมบัติที่ดีขึ้นคือ สามารถต้านทานน้ำมากกว่า 480 นาที ต้านทานแรงกดด้านข้าง 2.42 กิโลกรัม และต้านทานไขมันได้ 808 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของภาชนะบรรจุโดยผสมกากมะพร้าวและคัพพะข้าวโพดส่งผลให้ มีความต้านทานน้ำมากขึ้น และต้านทานแรงกดมากกว่าภาชนะบรรจุจากแป้งมันสำปะหลัง แต่ต้านทานไขมันน้อยกว่า อีกทั้งยังพบว่าขนาดอนุภาคของกากมะพร้าวมี

ผลต่อการดูดซึมน้ำและต้านทานไขมัน โดยขนาดกากมะพร้าว 710 ไมครอนจะทำให้การต้านทานน้ำลดลง ส่วนกากมะพร้าวขนาด 850 ไมครอนและกากมะพร้าวที่ไม่มีความสม่ำเสมอตั้งแต่ 710 ไมครอน-1.70 มิลลิเมตรนั้น จะทำให้ภาชนะบรรจุต้านทานน้ำได้มากขึ้น แต่การต้านทานไขมันลดลงจากภาชนะสูตรพื้นฐาน

4. กระถางปลูกต้นไม้จากธรรมชาติ

นางลักษณ์ (2547) ศึกษาการผลิตกระถางจากผักตบชวา เพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างผักตบชวากับดินเหนียวที่เหมาะสม โดยการนำดินเหนียวที่ตากแห้งมาบดให้ละเอียดพร้อมร่อนผ่านตะแกรงขนาดละเอียด 500 ไมโครเมตร จากนั้นนำผักตบชวามาผสมกับดินเหนียวตามสูตรผสมของกระถางในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยคลุกเคล้าให้ผักตบชวาเป็นเนื้อเดียวกันเติมน้ำให้เปียกในปริมาณ 2 เท่าของดินเหนียวและคอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ร้อยละ 0.3 และหมักทิ้งไว้ 1-2 คืน แล้วนำมาเข้าเครื่องรีดดินเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น จากนั้นนำเนื้อดินเหนียวสำเร็จดังกล่าวไปขึ้นรูปกระถางผักตบชวาด้วยเครื่องจักรไฟฟ้า โดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากปูนปลาสเตอร์ พบว่า กระถางที่ผลิตจากผักตบชวาและดินเหนียวในอัตราส่วน 1:5 (โดยน้ำหนัก) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เป็นเนื้อเดียวกันและขึ้นรูปกระถางได้ง่าย มีผิวเรียบ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณดินเหนียวในอัตราส่วน 1:8 และ 1:9 แล้วพบว่า การยึดเกาะของกระถางขณะขึ้นรูปได้ไม่ดี ทำให้กระถางแตกสลายได้ง่าย เมื่อนำไปทดสอบการปลูกต้นไม้ พบว่า กระถางที่มีอัตราส่วน 1:5 (โดยน้ำหนัก) มีความคงทนและยุบสลายได้ช้ากว่ากระถางที่มีส่วนผสมในอัตราส่วน 1:7, 1:6 และ 1:4 ตามลำดับ กระถางมีอายุการใช้งาน 3-5 เดือน และเมื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของกระถางโดยใช้กาวลาเท็กซ์เป็นสารยึดเหนียว (binder) ในปริมาณร้อยละ 4.0 ของน้ำหนักกระถางผักตบชวาแห้ง กาวโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) ความเข้มข้นร้อยละ 10 ผสมในปริมาณร้อยละ 1.25 ของน้ำหนักกระถางผักตบชวาแห้ง พบว่า สารยึดเหนียวดังกล่าวทำให้กระถางมีความทนทานต่อการใช้งานอยู่ได้นาน 6-8 เดือน นอกจากนี้การใช้พาราฟินและกลีเซอรอลเคลือบกระถางเพาะปลูกจากเชื้อกระดาษเหลือใช้ผสมกับขุยมะพร้าวด้วยอัตราส่วนของพาราฟินต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 1:2 และ 1:3 สามารถช่วยเพิ่มความคงทนและยืดอายุการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ใช้เคลือบดังกล่าวมีสมบัติเป็นสารไม่มีขี้ผึ้ง เมื่อรดน้ำต้นไม้จึงช่วยป้องกันการยุบสลายได้ดี และยังช่วยลดการติดเชื้อราภายนอกกระถางด้วย (ประสิทธิ์ และคณะ, 2546)

นิรนาม (2552) รายงานการผลิตกระดาษเพาะชำจากเศษวัสดุทางการเกษตร โดยใช้สูตรขุยมะพร้าว 100 กรัม ขุยมะพร้าว 150 กรัม และกาวแป้งเปียก 50 กรัม ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรงอัดที่ 10 ตัน ซึ่งจากแรงอัดดังกล่าวจะทำให้กระดาษที่ได้มีรูปทรงและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว และเมื่อนำไปตากแดดจะไม่เกิดรอยร้าวรวมทั้งไม่แตกที่ปากขอบกระดาษด้วย กระดาษจากขุยมะพร้าวที่ได้มีความแข็งแรงและทนทาน เมื่อนำไปใช้งานจริงมีความยืดหยุ่นสูง รากของกิ่งสามารถชอนไชออกจากกันของกระดาษได้ดี มีความสามารถในการอุ้มน้ำและการระบายความร้อนของกระดาษอยู่ในระดับดี และเมื่อฝังกระดาษลงในดินรากของกิ่งชำยังสามารถชอนไชออกทางด้านล่างและด้านข้างของกระดาษได้ดี อุ้มน้ำได้ดีและนาน สามารถรดน้ำทิ้งไว้ 2-3 วัน โดยไม่ต้องดูแลรดน้ำบ่อยๆ อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ

พรฤดี (2552) ประยุกต์วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มและเยื่อกระดาษเป็นกระดาษสำหรับกล้าไม้ พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของกากตะกอนน้ำมันปาล์มต่อกากตะกอนเยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียที่สามารถขึ้นรูปเป็นกระดาษได้ด้วยวิธีการกดอัด คือ ร้อยละ 100:0 และ 75:25 (โดยน้ำหนัก) และทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษโดยใช้สารเติมแต่ง พบว่า สารละลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 25 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ที่สามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงและการยึดเกาะของกระดาษได้ดี เมื่อทดสอบความต้านทานแรงกดและการตกกระแทก พบว่า กระดาษขึ้นรูปสามารถต้านทานแรงกดสูงสุดเท่ากับ 2,544 นิวตัน และมีความต้านทานการตกกระแทกที่ความสูงเท่ากับ 65.20 เซนติเมตร และผลการศึกษาจากกระบวนการย่อยสลายของกระดาษที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของดินบางประการ พบว่า กระดาษจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนเยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียที่ฝังในดินที่มีสภาพน้ำท่วมขังสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 48.05-54.05 (โดยน้ำหนัก) สูงกว่าการย่อยสลายในดินที่มีสภาพรดน้ำทุก 7 วัน ซึ่งเท่ากับร้อยละ 38.98-41.95 (โดยน้ำหนัก) และสภาพแห้งเท่ากับร้อยละ 7.06 -7.71 (โดยน้ำหนัก) การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของดินหลังจากการย่อยสลายในสภาพน้ำท่วมขัง พบว่า กระดาษที่มีการเพิ่มปริมาณปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ในส่วนผสมของกระดาษมีผลให้ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.365-0.482 เดซิซิเมนต่อเมตร และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 1.71-1.76 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.069-0.075 และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 23.17-28.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเพิ่มขึ้น และมากกว่าดินในสถานะที่รดน้ำทุก 7 วัน และสภาพแห้ง

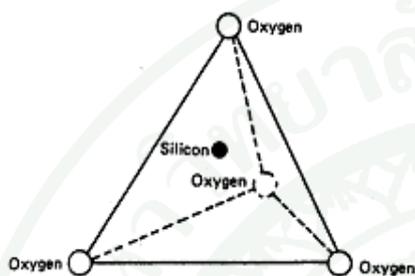
Yamauchi *et al.* (2006) นำกากของมันฝรั่งที่ได้จากกระบวนการกลั่นเหล้าโซชู (Shochu distillation less) หรือเรียกว่ากากเหล้าที่เหลือจากการกลั่น (distillation less) ผสมกับเศษเยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์ผลิตเป็นกระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อม (Eco paper pot) พบว่า อัตราส่วนกากเหล้าที่เหลือจากการกลั่น 3 กรัมต่อเศษเยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์ 100 กรัม (ร้อยละ 3) เหมาะสมในการผลิตเป็นกระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 2.47 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 0.45 กรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถต้านทานแรงกดตามขวางเท่ากับ 453 นิวตัน นอกจากนี้กระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อมยังมีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 2.04 ฟอสฟอรัส 4,170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โพแทสเซียม 6,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช และเมื่อนำไปทดสอบการเพาะปลูกต้นมะเขือเทศ พบว่า กระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อมยังคงรูปร่างเดิมโดยไม่สลายตัวจนกระทั่งนำกระถางไปแปลงเพาะปลูก หลังจากนั้นการปลูกรากของต้นมะเขือเทศจะทะลุผ่านกระถางและแผ่กว้างไปทั่วดิน กระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อมจะย่อยสลายตัวเป็นปุ๋ยอย่างชัดเจน โดยให้ผลผลิตของน้ำหนักรากเท่ากับ 10.68 กรัมต่อกระถาง ซึ่งมากกว่าการเพาะปลูกต้นมะเขือเทศด้วยกระถางจากเศษเยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์เพียงอย่างเดียว

Phokha *et al.* (2011) ศึกษาการผลิตกระถางจากไบออย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวต้นอ้อย ซึ่งประกอบด้วยไบออย มูลวัว กากจากมันสำปะหลัง และปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วน 1:1:4:1 (โดยน้ำหนัก) โดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ได้กระถางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างยาวด้านละ 150 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 1.36 กิโลกรัม นำกระถางจากไบออยตากแดดเป็นเวลา 3 วัน มีความหนาแน่น 0.00113 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความชื้นร้อยละ 22.20 เมื่อทดสอบความต้านทานแรงกดพบว่า สามารถต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 27.73 นิวตันต่อตารางเมตร

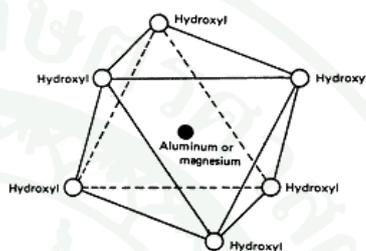
5. ดินเหนียวและอิทธิพลที่มีต่อความเหนียวของเนื้อดิน

ดินเหนียว (clays) หมายถึง เศษหินหรือแร่ หรืออนุภาคของเศษหิน ดินทราย ประกอบด้วยแร่ดิน (clay mineral) เป็นส่วนใหญ่ ปนด้วยสารอินทรีย์และแร่ชนิดต่างๆที่มีขนาดอนุภาคละเอียดกว่า 0.002 มิลลิเมตร ได้แก่ ควอตซ์ แคลไซต์ เฟลด์สปาร์ โดโลไมต์ ซีโอไลต์ เหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ ไททานเนียมออกไซด์ จึงทำให้ลักษณะของเนื้อดินมีความละเอียด และมีสภาพพลาสติกเมื่อเปียกน้ำจะแข็งและแกร่งเมื่อแห้ง ลักษณะโครงสร้างของแร่ดินเหนียวพื้นฐานที่สำคัญมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบซิลิกอน-ออกซิเจน เตตระฮีดรอล (silicon-oxygen tetrahedral)

ประกอบด้วย ซิลิกา 1 อะตอมล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เป็นรูปทรงที่มีช่องรูปสี่ด้านเชื่อมต่อกัน เรียกว่า ซิลิกาชีท (silica sheet) ดังภาพที่ 3(ก) แบบอลูมิเนียม (aluminum) หรือแมกนีเซียมออกตะฮีดรอล (magnesium octahedral) ประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม 1 อะตอมล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม เป็นรูปทรงที่มีช่องรูปแปดด้านเชื่อมต่อกันเป็นแผ่นเรียกว่า บรูไซต์ชีท (brucite sheet) ดังภาพที่ 3(ข) (ศรีไจล, 2546)



(ก) silicon-oxygen tetrahedral unit



(ข) aluminum or magnesium octahedral unit

ภาพที่ 3 โครงสร้างอะตอมของแร่ประกอบดินเหนียวพื้นฐาน (ก) แบบซิลิกอล-ออกซิเจน เททระฮีดรอล (ข) แบบอลูมิเนียม หรือแมกนีเซียมออกตะฮีดรอล

ที่มา: ศรีไจล (2546)

ดินเหนียวขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่อาศัยความเหนียวของดิน จะมีความเหนียวต่างกันตามแหล่งของกำเนิดดิน ดินเหนียวที่มีความเหนียวมากที่สุด ได้แก่ ดินที่ใช้ปั้น โองจังหวัดราชบุรี ดินเหนียวที่ใช้ปั้นรูปกระถางต้นไม้ หม้อ และทำอิฐเป็นดินเหนียวแถบจังหวัดปทุมธานี (ปรีดา, 2547) ซึ่งมีลิกต์ออกไซด์น้ำตาล ซึ่งประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 60.3 อลูมินาร้อยละ 13.2 และเหล็กออกไซด์ร้อยละ 6.4 (นงลักษณ์, 2547)

อิทธิพลที่มีต่อความเหนียวของเนื้อดิน (ปรีดา, 2547) ดังต่อไปนี้

1. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค อนุภาคที่ละเอียดมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคหยาบ อนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นระเบียบมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดและมีรูปร่างไม่เป็นระเบียบจะมีเนื้อสัมผัสกันมากกว่าอนุภาคหยาบๆหรืออนุภาคที่มีรูปร่างลูกบาศก์หรือทรงกลม จึงมีแรงดูดซึ่งกันและกันมากกว่า

2. การใช้ของเหลวที่มีประจุและมีความหนืดมากผสมช่วยปรับปรุงให้มีความเหนียวดีขึ้น
3. ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่ถูกดูดซับบนผิวของเนื้อดิน เช่น เนื้อดินที่มี H^+ หรือ Ca^{2+} อยู่บนผิวจะมีความเหนียวดีกว่าเนื้อดินที่มี Na^+ อยู่บนผิว
4. สารอินทรีย์ที่ช่วยทำให้ความเหนียวดีขึ้นในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเป็นอะลูมินา เช่น กาว แป้ง และจีฟี่น
5. การหมักและการนวดจะช่วยให้ความเหนียวดีขึ้น เนื่องจากการหมักทำให้เนื้อดินกับน้ำรวมตัวกันได้ดีและทั่วถึง

6. การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ อินทรีย์วัสดุจะย่อยสลายได้ทางชีวภาพควรเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ ไม่เป็นพิษ ในช่วงเวลาและสภาวะแวดล้อมที่กำหนด ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบขนาดเล็กมีความเสถียรเช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และน้ำ (ชนาวดี, 2549)

6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

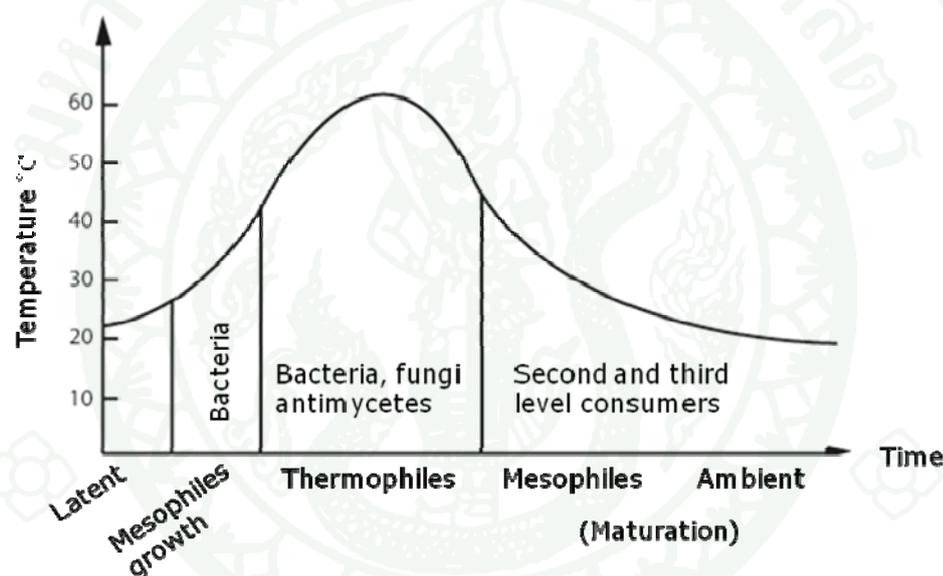
ปัจจัยสำคัญสำหรับการเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ การปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ได้แก่

6.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการควบคุมทั้งกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพ หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินโดยตรง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้มาก โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 25 - 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ การคอมโพสท์เป็นรูปแบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ สารอินทรีย์จะย่อยสลายได้รวดเร็วที่สุดในช่วง 52 - 60 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง (ชนาวดี, 2549) กิจกรรมของจุลินทรีย์ในการคอมโพสท์อาจจำแนกจุลินทรีย์ตามช่วงอายุที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเป็น 3 ประเภทดังนี้

ประเภทจุลินทรีย์	อุณหภูมิที่เจริญได้ดี (องศาเซลเซียส)
ชอบอุณหภูมิต่ำหรือไซโครไฟล์ (Psychrophile)	0 - 25
ชอบอุณหภูมิตปานกลางหรือมีโซไฟล์ (Mesophile)	25 - 45
ชอบอุณหภูมิตสูงหรือเทอร์โมไฟล์ (Thermophile)	>45

ซึ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการคอมโพสท์จะมีบทบาทสำคัญต่อการสลายตัวของอินทรีย์วัสดุในแต่ละช่วงเวลา สามารถแบ่งช่วงระยะของการคอมโพสท์ออกเป็น 3 ระยะตามอุณหภูมิ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 อุณหภูมิและชนิดของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตในแต่ละระยะของการหมัก

ที่มา: Day and Shaw (2001)

6.1.2 ปริมาณแก๊สออกซิเจน (Aeration)

แก๊สออกซิเจนช่วยในการเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ แม้ว่าในธรรมชาติจะมีจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนอยู่มาก แต่จุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนมีปริมาณที่มากกว่า จึงทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการย่อยสลายที่ช้าและทำให้เกิดกลิ่นเหม็น ส่วน

กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการสร้างพลังงานที่มีประสิทธิภาพที่สุดของจุลินทรีย์ โดยการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสมบูรณ์ ดังนั้นสภาพการระบายอากาศของดินจึงมีผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุโดยตรง ในทางตรงกันข้าม ดินที่มีสภาพขาดอากาศหรือน้ำขัง อัตราการย่อยสลายจะลดลงและเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้ผลผลิตเป็นแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ชนาวดี, 2549)

6.1.3 ความชื้น (Moisture)

น้ำและความชื้นจะช่วยเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพและการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ หากดินมีความชื้นสูงเกินไป อัตราการย่อยสลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากขาดออกซิเจน แต่ถ้าความชื้นของดินต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม อัตราการย่อยสลายจะค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนสภาพแล้งของจุลินทรีย์ด้วย ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายอย่างรวดเร็วอยู่ที่ร้อยละ 45-55 (ชนาวดี, 2549)

6.1.4 ขนาดวัสดุ (Particle size)

ขนาดวัสดุจะมีผลต่อการอุ้มน้ำ ความพรุน และการถ่ายเทอากาศ ยิ่งขนาดวัสดุเล็กลงจะมีผลให้กระบวนการย่อยสลายเร็วขึ้น เนื่องจากมีพื้นผิวสัมผัสมากที่ทำให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายได้มากขึ้น แต่ไม่ควรอัดแน่นเกินไป (ชนาวดี, 2549; ยงยุทธ และคณะ, 2551) เพราะจะไปขัดขวางการแพร่กระจายของออกซิเจนที่จะเข้าไปในกองคอมโพสท์ในช่วงเทอโมไฟล์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีความต้องการออกซิเจนมาก แต่ถ้าหากวัสดุเริ่มต้นมีขนาดใหญ่เกินไป จะมีความพรุนสูง จะทำให้กองคอมโพสท์แห้งได้ง่ายซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำหรือความชื้นไม่เพียงพอต่อการหมักในระยะต่อมา (พรฤดี, 2552)

6.1.5 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง เป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในดิน โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ pH เป็นกลางการสลายตัวจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าในช่วงกรดหรือด่างเกินไป ดังนั้น การปรับ pH ของดินที่เป็นกรดให้เป็นกลาง จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินด้วย ช่วง pH ของดินที่ต่ำกว่า 4.5 (กรดจัด) หรือสูงกว่า 9 (ด่างจัด) มักมีผล

ยับยั้งการสลายตัวอย่างมาก นอกจากนี้ หากช่วง pH ของดินที่เป็นกรดค่อนข้างมาก กิจกรรมของแบคทีเรียในดินส่วนใหญ่จะลดลง ในขณะที่เชื้อรายังทนทานอยู่ได้ ดังนั้น กิจกรรมการย่อยสลายจึงเกิดจากเชื้อราเป็นส่วนใหญ่ (ชนาวดี, 2549)

6.1.6 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกจากจะย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานไปใช้แล้ว จุลินทรีย์ยังนำเอาธาตุจากสารอินทรีย์ไปใช้สร้างสารประกอบต่างๆ ของเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ธาตุคาร์บอนซึ่งจุลินทรีย์ต้องนำมาใช้สังเคราะห์สารประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักของเซลล์กับธาตุไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน กรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิก ที่มีอยู่เป็นปริมาณมากในเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน จึงมักเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นจะมีธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์และทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ดำเนินต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยอัตราส่วนที่จัดว่าเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 20: 1 ถึง 30: 1 (ชนาวดี, 2549)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

- 1.1 กากเบียร์ จาก บริษัท ปทุมธานี บริวเวอรี่ จำกัด จังหวัดปทุมธานี
 - 1.1.1 กากเบียร์ที่มีส่วนผสมข้าวมอลที่ร้อยละ 100
 - 1.1.2 กากเบียร์ที่มีส่วนผสมข้าวมอลที่ร้อยละ 70 และปลายข้าวร้อยละ 30
- 1.2 ดินเหนียว จากจังหวัดปทุมธานี
- 1.3 พอลิไวนิลอะซิเตท อิมัลชัน (polyvinyl acetate emulsion)
- 1.4 กลีเซอรอล (glycerol) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2. สารเคมีที่ใช้เตรียมสารละลาย

- 2.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether)
- 2.2 เอทิลแอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์
- 2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) (Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 2.4 โซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate, Na_2SO_4) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.5 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ (sulfuric acid, H_2SO_4) (Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 2.6 กรดบอริก (boric acid, H_3BO_3) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.7 กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.8 กรดไนตริก (nitric acid, HNO_3) (Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 2.9 กรดเปอร์คลอริก (perchloric acid, HClO_4) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.10 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) (Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 2.11 แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.12 แอมโมเนียมเมทาวานาเดต (ammonium metavanadate, NH_4VO_3) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)

- 2.13 แอมโมเนียมอะซิเตท (ammonium acetate, $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.14 แอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟต (ammonium ferrous sulfate, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- 2.15 โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) (Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 2.16 เฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulfate, FeSO_4)
- 2.17 ออร์โทฟีแนนโทรอลีน (O-phenanthroline ferrous sulfate indicator)
- 2.18 คอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.19 โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate, K_2SO_4) (AJAX, Finechem, ประเทศออสเตรเลีย)
- 2.20 ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein indicator)
- 2.21 เมทิลออเรนจ์ (methyl orange indicator)
- 2.22 ผงเซลลูโลส (cellulose powder) สกัดจากเศษผ้าฝ้าย (ปัญหาพิเศษนิสิตปริญญาตรี เรื่อง การสลายตัวทางชีวภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีน/ผงเซลลูโลสสกัดจากเศษผ้าฝ้ายของภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ)

3. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1 เครื่องชั่งวิเคราะห์ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analysis balance รุ่น AT 400) (Mettler Toledo, ประเทศไทย)
- 3.2 เครื่องชั่งวิเคราะห์ทศนิยม 1 ตำแหน่ง (analysis balance รุ่น AT 400) (Sartorius, ประเทศออสเตรเลีย)
- 3.3 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (soctex Model HT 220) (Tacator, ประเทศสวีเดน)
- 3.4 เครื่องกลั่นวิเคราะห์ไนโตรเจน (micro-kjeldahl distillation apparatus รุ่น VAP20) (Gerhardt, ประเทศเยอรมนี)
- 3.5 เครื่องให้ความร้อน (hot plate รุ่น 6910-26) (Bransted themolyne Coporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.6 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer รุ่น Spectronic 21) (Miltonroy company, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.7 เครื่องย่อย (digesting apparatus รุ่น Ger 70400) (Gerhardt, ประเทศเยอรมนี)

- 3.8 เครื่องวัดปริมาณโลหะด้วยการดูดซับ (atomic absorption spectrophotometer ;VARIAN Spectro AA 240)
- 3.9 เครื่องผสมสาร (vortex mixer รุ่น Ger 700) (Gerhardt, ประเทศเยอรมนี)
- 3.10 เครื่องเขย่า (shaker)
- 3.11 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter รุ่น 420) (Oakton, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.12 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity meter รุ่น 4010) (Jenway, ประเทศอังกฤษ)
- 3.13 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press machine รุ่น PML-10) (Pamalyne, ประเทศไทย)
- 3.14 เครื่องบดย่อย (hammer mill) (Moulinex รุ่น DPA1)
- 3.15 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดทับ (compression test machine รุ่น Instron 5965) (ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.16 เครื่องทดสอบความต้านทานการตกกระแทก (drop resistance)
- 3.17 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
- 3.18 เตาเผา (muffle furnace)
- 3.19 อุโมงค์ลมร้อน (heat tunnel)
- 3.20 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dryer)
- 3.21 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper)
- 3.22 ถ้วยวัดความชื้น (moisture can)
- 3.23 โถแก้วสูญญากาศ (dessicator)
- 3.24 บีกเกอร์ (beaker) ชนิดไม่มีปาก สำหรับย่อยขนาด 600 มิลลิลิตร
- 3.25 แม่พิมพ์เหล็กขึ้นรูป (steel mold)
- 3.26 ตะแกรงร่อนขนาด 0.5 มิลลิเมตร(Sieve) (Retch, ประเทศเยอรมันนี)
- 3.27 ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร(Sieve) (Retch, ประเทศเยอรมันนี)
- 3.28 ตะแกรงร่อนขนาด 8 มิลลิเมตร(Sieve) (Retch, ประเทศเยอรมันนี)
- 3.29 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
- 3.30 เทอร์โมมิเตอร์

วิธีการ

1. การตรวจสอบองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหาร ปริมาณโลหะหนัก และสมบัติทางกายภาพของกากเบียร์

1.1 เตรียมกากเบียร์ โดยการนำมาผึ่งให้แห้งแล้วไปอบด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dry) ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-6 ชั่วโมงจนกระทั่งกากเบียร์แห้ง และเก็บในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป (AOAC, 1990)

1.2 วิเคราะห์หาความชื้น โดยนำตัวอย่างที่บดด้วยเครื่องบดย่อยแล้วประมาณ 5 กรัม ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียม อบตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 6 ชั่วโมง หรือจนได้น้ำหนักคงที่แตกต่างกันไม่เกิน 0.0002 กรัม ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วคำนวณหาความชื้น (ปราณี, 2541)

1.3 วิเคราะห์หาปริมาณไขมัน (crude fat) ด้วยวิธี direct solvent extraction โดยชั่งตัวอย่างที่อบแห้งบดละเอียดแล้วประมาณ 2-3 กรัม สกัดไขมันออกจากตัวอย่างโดยใช้ปีโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย เมื่อสกัดไขมันแล้วแยกตัวทำละลายออกจากไขมันโดยการอบในตู้อบลมร้อน นำไขมันที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนัก (สมจิต และคณะ, 2549)

1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเส้นใย (crude fiber) โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วมาวิเคราะห์ ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม ต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.225 นอร์มอล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที เอากระจกนาฬิกาปิดบีกเกอร์ไว้ พร้อมนำถุงน้ำแข็งวางไว้บนกระจก กรองตัวอย่างขณะร้อน โดยใช้ผ้าขาวบาง 2 ชั้น ถ่ายตะกอนบนผ้าขาวบางลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.313 นอร์มอล จำนวน 20 มิลลิลิตร แล้วต้มเป็นเวลา 30 นาที กรองตัวอย่างอีกครั้ง โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 เมื่อทำการกรองตะกอนหมด ให้ใช้น้ำร้อนล้างตะกอน แล้วล้างตะกอนที่ติดค้างตามกรวยกรองให้สะอาด โดยใช้สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ นำกระดาษกรองที่มีตะกอนใส่ลงใน crucible แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาทำให้เย็นใน desiccator ประมาณ 45 นาทีแล้วชั่งน้ำหนัก นำกระดาษและตัวอย่างมาทำการเผาที่ furnace อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีทิ้งใน desiccator ประมาณ 1 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณเส้นใย (AOAC, 2000; สมจิต และคณะ, 2549)

1.5 วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน โดยนำตัวอย่างที่บดละเอียดจำนวน 0.40 กรัม ไปย่อยสลาย (digestion) ด้วย H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture digestion (อัตราส่วน 100:10:1) สลายบน digestion apparatus จากนั้น นำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีการกลั่นโดยนำสารละลาย (aliquot) ที่ได้ ใส่นลงในขวดรูปชมพู่ เดิม 40 เปอร์เซ็นต์ไซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงไป 5 มิลลิลิตร แล้วทำการกลั่น ไนโตรเจนซึ่งอยู่ในรูปแอมโมเนียมซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียม เก็บแอมโมเนียมที่กลั่นได้ ที่อยู่รูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายกรวดปริก 5 มิลลิลิตร ไตรเตทสารละลายที่กลั่นได้ด้วยกรดซัลฟิวริก 0.01 นอร์มอล (0.005 M H_2SO_4) ทำ blank พร้อมตัวอย่าง บันทึกลงผล (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.6 วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส โดยนำตัวอย่างที่บดละเอียดจำนวน 0.40 กรัม ไปย่อยสลาย (digestion) ด้วย H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture digestion (อัตราส่วน 100:10:1) สลายบนเครื่องย่อย จากนั้น นำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส (vanadomolybdate yellow color) โดยนำสารละลาย (aliquot) ที่ได้จากการย่อยตัวอย่างจำนวน 3 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร เติม 5 เปอร์เซ็นต์แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate) และ 0.25% แอมโมเนียมเมทาวานาเดท (ammonium metavanadate) อย่างละ 1 มิลลิลิตร เขย่าแล้วทิ้งไว้ 20 นาที จึงนำไปวัดความเข้มข้นของสีเหลืองที่เกิดขึ้น อ่านค่าเปอร์เซ็นต์ transmittance ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดแสงที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร ทำ standard curve ของ 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 mgPL^{-1} แล้วจึงนำไปวัดความเข้มข้นของสีเหลืองที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับตัวอย่าง บันทึกลงค่าที่อ่านได้จากสารละลายมาตรฐานลงในกระดาษกราฟ (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.7 วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม โดยนำตัวอย่างที่บดละเอียดจำนวน 0.40 กรัม ไปย่อยสลาย (digestion) ด้วย H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture digestion (อัตราส่วน 100:10:1) สลายบน digestion apparatus จากนั้น นำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมโดยวิธี atomic emission spectroscopy ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer (VARIAN SpectrAA 240) (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.8 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี ตะกั่วและแคดเมียม โดยนำตัวอย่างที่บดละเอียดจำนวน 0.4 กรัมมาย่อยด้วย HNO_3 - H_2SO_4 - HClO_4 acid mixture digestion (อัตราส่วน 5:1:2) แล้วนำไปย่อยสลายบนเครื่องย่อย จนได้สารละลายใสจึงยกกลง ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าสารละลายให้เข้ากัน แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ลงในขวดพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม

เหล็ก สังกะสี ตะกั่วและแคดเมียมโดยวิธี atomic emission spectroscopy ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer (VARIAN SpectrAA 240) (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.9 วิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยนำตัวอย่างที่บดจำนวน 0.10 กรัม บรรจุตัวอย่างลงใน erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1 นอร์มอลลงไป 15 มิลลิลิตร จากนั้น รินกรดซัลฟิวริกอย่างเข้มข้นลงไป 10 มิลลิลิตร โดยเร็ว แก้วงวดรูปชมพูไปรอบๆ เบาๆ เพื่อให้ น้ำยากับตัวอย่างเข้ากันประมาณ 1-2 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร แล้วหยดออร์โทฟอสเฟต โทริลีนเฟอร์รัสซัลเฟตอินดิเคเตอร์ลงไป 0.5 มิลลิลิตร จากนั้น ไตเตรตด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต จนกระทั่งสีเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลปนแดง จุดปริมาณของน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมตและเฟอร์รัสซัลเฟตที่ใช้ทำ blank โดยใช้ 1 นอร์มอลของโพแทสเซียมไดโครเมต 10 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาณเดียวกับที่เติมลงไปในตัวอย่าง และดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่าง (Walkley and Blank, 1934)

1.10 วิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (อัตราส่วนตัวอย่าง:น้ำเท่ากับ 1:6) นำตัวอย่างซึ่งได้บดไว้แล้วอย่างละเอียด 5 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตรผสมกับน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้ตัวอย่างและน้ำเข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นอ่านค่าด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (สุนันทา, 2550)

1.11 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (อัตราส่วนตัวอย่าง:น้ำ เท่ากับ 1:10 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) นำตัวอย่างที่บดไว้แล้วอย่างละเอียด 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า บันทึกข้อมูล และอุณหภูมิที่วัด (สุนันทา, 2550)

2. การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมของกากเบียร์ กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่เหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปกระดาษ

2.1 วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ทำการทดลองจำนวน 16 สูตร ดังตารางที่ 4

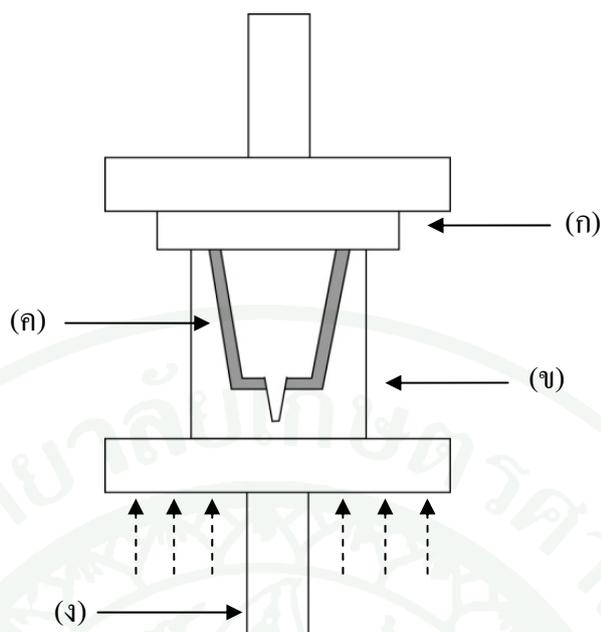
2.2 นำกากเบียร์และดินเหนียวมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำส่วนผสมในแต่ละสูตรมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันและนวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วหมัก

ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำส่วนผสมดังกล่าวใส่ลงในแม่พิมพ์ตัวเมีย และกดทับด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ทำการกดอัดขึ้นรูปเป็นกระถางด้วยเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก ดังภาพที่ 5 ด้วยความดัน 12 บาร์ เป็นเวลา 1 นาที ณ อุณหภูมิห้อง นำกระถางที่ได้เป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อน และผึ่งแห้งในที่ร่มเพื่อป้องกันการหดตัว ทำให้เกิดการแตกและเสียรูปทรงได้ จากนั้น อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างกระถางไว้ในถุงผ้า เพื่อนำไปวิเคราะห์

ตารางที่ 4 สูตรส่วนผสมสำหรับกระถางจากกากเบียร์

สูตร ส่วนผสม	กากเบียร์ (BSG) (กรัม)	ดินเหนียว (Clay) (กรัม)	กลีเซอรอล (Gly) (กรัม)	พอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) (กรัม)
T ₁	150	100	25	25
T ₂	150	100	25	50
T ₃	150	100	50	25
T ₄	150	100	50	50
T ₅	125	100	25	25
T ₆	125	100	25	50
T ₇	125	100	50	25
T ₈	125	100	50	50
T ₉	100	100	25	25
T ₁₀	100	100	25	50
T ₁₁	100	100	50	25
T ₁₂	100	100	50	50
T ₁₃	75	100	25	25
T ₁₄	75	100	25	50
T ₁₅	75	100	50	25
T ₁₆	75	100	50	50

หมายเหตุ ส่วนผสมต่อหนึ่งกระถาง



ภาพที่ 5 แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปกระถางด้วยเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก
 (ก) แม่พิมพ์เหล็กตัวผู้ (ข) แม่พิมพ์เหล็กตัวผู้ (ค) ส่วนผสมตัวอย่างกระถาง
 (ง) เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก

2.3 นำกระถางที่ได้จากข้อ 2.2 มาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและตรวจสอบมิติทางกายภาพ
 ดังนี้

- 2.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.5
- 2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.6
- 2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.7
- 2.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว และ แคดเมียม โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.8
- 2.3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.9
- 2.3.6 การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.10
- 2.3.7 การวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 1.11
- 2.3.8 หาความหนา โดยตัดกระถางให้มีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร จากนั้น วัดความหนา ด้วยเครื่องวัดความหนา 8 จุด โดยแต่ละจุดไม่ซ้อนทับกัน บันทึกค่าที่ได้ (TAPPI T 411 om-89)

2.3.9 หากความชื้น นำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.0002 กรัม คัดน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและนำตัวอย่างพร้อมกับกระป๋องความชื้น ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส อบจนความชื้นคงที่ จากนั้น นำตัวอย่างใส่ในถุงพลาสติก แล้วทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น และนำไปชั่งหาน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังอบ (TAPPI T 412 om-88)

3. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของกระดาษ

3.1 หากความต้านทานแรงกด (compression resistance) วางกระดาษบนแผ่นเครื่องทดสอบ ความต้านทานแรงกด ทำการกดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง โดยใช้อัตราเร็วในการ กด (compression rate) เท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที และบันทึกค่าแรงกดที่การเสียรูป 20 มิลลิเมตร (ASTM D 642) (Sørensen and Hoffmann, 2004)

3.2 หากการดูดซึมน้ำ (water absorption) โดยการนำวัสดุโอเอซิสมาตัดให้มีขนาดเท่ากับมิติ ภายในของกระดาษ นำวัสดุดังกล่าวไปแช่น้ำให้วัสดุอิ่มตัว จากนั้น นำวัสดุดังกล่าววางลงด้านใน ของกระดาษ แล้วทิ้งไว้ ชั่ง และบันทึกน้ำหนักที่ได้ ณ เวลาที่ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 นาที (TAPPI T441 om-90) (Lee *et al.*, 2008)

3.3 หากความต้านทานการตกกระแทก (drop resistance) โดยปล่อยให้ตกกระแทก ณ ความ สูงที่เพิ่มขึ้นทีละ 10 เซนติเมตรจนถึง 200 เซนติเมตร โดยทำการตกกระแทกจนกระทั่งกระดาษไม่ สามารถใช้งานได้ (ASTM D 5276)

4. การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (ASTM D 5338) (Kale *et al.*, 2007; Kijchavengkul *et al.*, 2006)

4.1 เตรียมวัสดุตัวอย่าง นำกระดาษที่เตรียมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลีเซอร์อล และพอลิ ไวนิลอะซิเตท และจากสูตรที่เหมาะสมในการขึ้นรูป มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 เซนติเมตร สูงประมาณ 8 เซนติเมตร

4.2 เตรียมแหล่งจุลินทรีย์ โดยนำดินขุยไผ่ (ตราตะวัน) มาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม จากนั้น ร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 8 มิลลิเมตร ซึ่งดินควรมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีความพรุนตัว

4.3 ฟังวัสดุตัวอย่างลงในแหล่งจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะคอมโพสท์ที่มีการควบคุม ใช้ถังทดสอบ (bioreactor) ที่มีปริมาณแหล่งจุลินทรีย์สูงไม่เกิน 3 ใน 4 ของความสูงของถังทดสอบ ซึ่งการทดสอบประกอบด้วย ถังทดสอบตัวอย่าง (sample) ตัวอย่างละ 3 ถัง ถังทดสอบไร้วัสดุตัวอย่าง (blank) ซึ่งใส่เฉพาะแหล่งจุลินทรีย์จำนวน 3 ถัง ถังควบคุมเชิงบวก (positive control) ประกอบด้วยผงเซลลูโลส (cellulose powder) 3 ถัง จากนั้น นำวัสดุตัวอย่างฝังลึกลงไป 5 เซนติเมตรจากผิวดิน ทดสอบเป็นระยะเวลา 45 วัน (ชนาวดี, 2549; Kale *et al.*, 2007)

4.4 ทาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถาง (biodegradability) โดยใช้ระบบ cumulative measurement respirometric (CMR) ด้วยวิธีทดสอบของ Kale *et al.* (2007) และดัดแปลงจาก Kijchavengkul *et al.* (2006) (ดังแสดงในแผนภาพที่ 4) โดยหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลาย เริ่มต้นจากการปั๊มอากาศที่ความดัน 5 ปาสกาล ผ่านเข้าถังสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 นอร์มอล จากนั้น อากาศจะถูกส่งผ่านถึงที่บรรจุด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70-90 อากาศที่ได้จะถูกส่งไปยังถังทดสอบด้วยอัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที วิเคราะห์หาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอลเป็นตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้น เอาสารละลายตัวอย่าง (aliquot) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรมาไตเตรทด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.186 นอร์มอล (C) ซึ่งแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด ในสารละลายตัวอย่างไตเตรทจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูกลายเป็นใสไม่มีสี หยดเมทิลออเรนจ์แล้วไตเตรทอีกครั้งจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มกลายเป็นสีแดง ซึ่งปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก (V) ที่ทำการไตเตรทในขั้นตอนที่สองนี้จะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (gCO₂) ดังสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ

$$gCO_2 = \frac{V \times C \times 44}{1000} \quad (1)$$

$$\% \text{ Biodegradability} = \frac{gCO_2^{a+p} - gCO_2^b}{g_{\text{material}} (\% C_{\text{material}} / 100)(44/12)} \times 100 \quad (2)$$

% Biodegradability = ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ

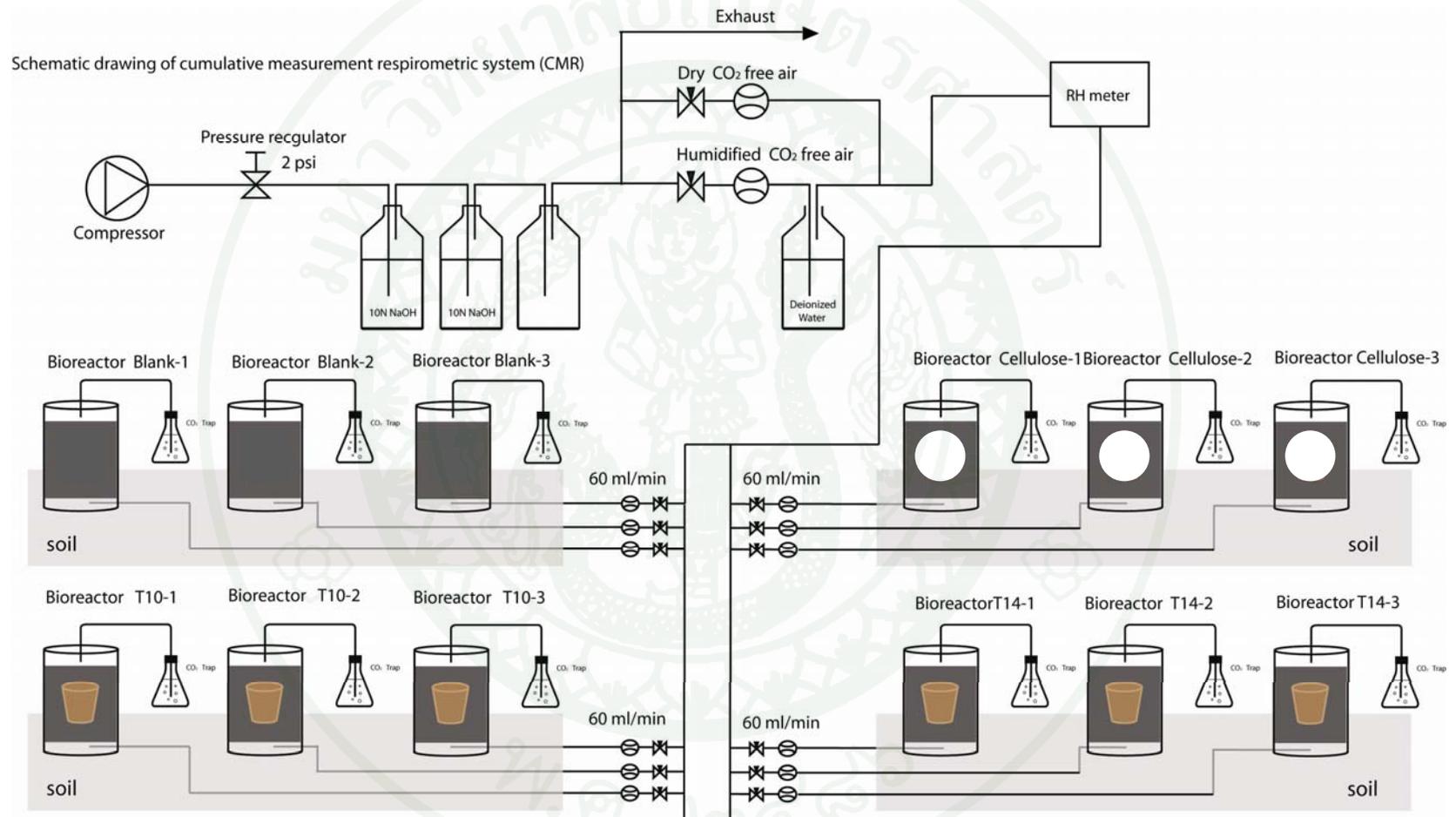
gCO_{2s+p} = ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังวัสดุตัวอย่างและถังควบคุมเชิงบวก (กรัม)

gCO_{2b} = ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังทดสอบไร้วัสดุตัวอย่าง (กรัม)

$g_{material}$ = น้ำหนักของวัสดุตัวอย่าง (กรัม)

% $C_{material}$ = อินทรีย์คาร์บอนของตัวอย่าง (ร้อยละ)

4.5 เก็บข้อมูลในระหว่างการย่อยสลาย โดยทำการวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายและวัดอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการย่อย วัดปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของแหล่งจุลินทรีย์ พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักกระถางก่อนและหลังการย่อยสลาย



ภาพที่ 6 การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษด้วย ระบบ cumulative measurement respirometric (CMR)

5. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารในดินภายใต้ภาวะควบคุมทั้งก่อนและหลังการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถาง

5.1 สุ่มเก็บตัวอย่างดินภายหลังจากการย่อยสลายทางชีวภาพ 45 วัน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซ็นติเมตร นำดินมาผึ่งแห้งในที่ร่ม จากนั้นบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 2 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

5.4.1 หาค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของดิน โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 วัดค่า pH ของสารแขวนลอย (suspension) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

5.4.2 หาค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ของดิน โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1:5 คนให้เข้ากัน เขย่าเป็นเวลา 30 นาทีและตั้งทิ้งไว้ 15 นาที แล้วนำน้ำใส่ที่ได้ไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

5.4.3 หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter: OM) โดยใช้ตามวิธี Walkley and Black Titration (1934)

5.4.4 หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ของดิน โดยการย่อยตัวอย่างดินด้วยสารละลาย digestion mixture ซึ่งประกอบด้วย H_2SO_4 : Na_2SO_4 : Se ในอัตราส่วน 100:10:1 นำสารละลายตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีการกลั่น (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

5.4.5 หาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) ของดิน โดยสกัดตัวอย่างดินด้วยสารละลาย Bray II แล้วนำสารละลายตัวอย่างไปทำปฏิกิริยากับกรดแอสคอบิก ($C_6H_8O_6$) ได้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินใส วัดความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

5.4.6 หาปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) ของดิน โดยนำตัวอย่างดินไปสกัดด้วย 1 นอร์มอล แอมโมเนียมอะซิเตรท (1 N NH_4OAc) (pH 7.00) แล้วนำสารละลายตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นของธาตุชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธี Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 17

6. สถานที่ทำการทดลอง

6.1 ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

6.2 ห้องปฏิบัติการเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

6.3 ห้องปฏิบัติการเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

7. ระยะเวลาการทำวิจัย

เริ่มต้นทำการวิจัยตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 รวมระยะเวลาในการทำงานวิจัย 24 เดือน

ผลและวิจารณ์

1. องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหาร ปริมาณโลหะหนัก และสมบัติทางกายภาพของกากเบียร์

กากเบียร์เหลือทิ้งเป็นของผสมที่ได้จากกระบวนการผลิตเบียร์ ในขั้นตอนการทำเมชซึ่งโดยการย่อยข้าวมอลต์จากข้าวบาร์เลย์และธัญพืชอื่นๆ ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามสูตรการผลิตเบียร์แต่ละยี่ห้อ จากผลการทดลองของกากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 100 และกากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 (ตารางที่ 5) พบว่าองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของกากเบียร์ส่วนใหญ่ คือ เส้นใยหยาบ โดยกากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 100 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเส้นใยหยาบร้อยละ 19.920 มากกว่ากากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของปริมาณเส้นใยหยาบเท่ากับร้อยละ 12.696 เนื่องจากเส้นใยหยาบที่ได้ มาจากเปลือกเมล็ดข้าวบาร์เลย์ประกอบด้วยเปลือกชั้นนอก (husk) เปลือกหุ้มเมล็ด (pericarp) ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส (cellulose) พอลิแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulose) และลิกนิน (lignin) (Mussatto *et al.*, 2006a)

อย่างไรก็ตาม กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดมากกว่ากากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 100 คือ ร้อยละ 5.629, 0.625, 0.017, 0.108 และ 0.171 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากรายงานการวิจัยของ Mbagwu and Ekwealor (1990) คือ ร้อยละ 5.10 นอกจากนี้ กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 มีเฉลี่ยค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.20 และค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.26 เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่ากากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 100 ทั้งนี้กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 100 และกากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 มีปริมาณอินทรียวัตถุเท่ากับร้อยละ 68.939 และ 50.298 ตามลำดับ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 13.117 และ 5.169 ตามลำดับ ซึ่งทั้งปริมาณอินทรียวัตถุและสัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นปัจจัยบ่งชี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์และการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (ธนาวัต, 2549) โดยอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมและเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ควรอยู่ในช่วง 20:1 ถึง 40:1 ตามข้อกำหนดของวัสดุปลูก (Otost *et al.*, 2008)

นอกจากนี้ ปริมาณธาตุโลหะหนักในกากเบียร์ที่หลงเหลือก็เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ จากผลการวิเคราะห์ ยังพบว่า กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลที่ร้อยละ 70 มีปริมาณเหล็กต่ำกว่าในกากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลที่ร้อยละ 100 คือ 150.083 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่มีปริมาณของสังกะสี ตะกั่ว แคดเมียมทั้งหมดสูงกว่ากากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลที่ร้อยละ 100 คือ 98.396, 4.867 และน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งจัดว่ายังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อพืช นั่นคือ ปริมาณของเหล็ก สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมทั้งหมดต้องไม่เกิน 300, 150, 5 และ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Otost *et al.*, 2008)

ตารางที่ 5 องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ปริมาณธาตุอาหาร ปริมาณโลหะหนัก และสมบัติทางกายภาพของกากเบียร์

คุณลักษณะของกากเบียร์	กากเบียร์ที่มีส่วนผสม ข้าวมอลที่ร้อยละ 100	กากเบียร์ที่มีส่วนผสม ข้าวมอลที่ร้อยละ 70
ความชื้น (ร้อยละ)	11.175±0.024	5.465±0.179
ไขมัน (ร้อยละ)	6.470±0.196	8.844±0.145
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ)	19.920±0.589	12.696±0.880
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	3.045±0.126	5.629±0.277
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ร้อยละ)	0.400±0.288	0.625±0.119
โพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละ)	0.011±0.001	0.017±0.001
แคลเซียมทั้งหมด (ร้อยละ)	0.101±0.005	0.108±0.001
แมกนีเซียมทั้งหมด (ร้อยละ)	0.154±0.005	0.171±0.005
เหล็กทั้งหมด (mg/kg)	155.479±17.395	150.083±26.748
สังกะสีทั้งหมด (mg/kg)	67.321±5.010	98.396±4.527
ตะกั่วทั้งหมด (mg/kg)	4.635±2.027	4.867±1.093
แคดเมียมทั้งหมด (mg/kg)	< 0.1	< 0.1
ความเป็นกรด-ด่าง (1:5)	6.67±0.208	6.20±0.000
ค่าการนำไฟฟ้า (1:10, dSm ⁻¹)	0.52±0.010	0.26±0.015
อินทรีย์วัตถุ (%)	68.939±5.864	50.298±6.891
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	13.117±0.653	5.169±0.464

จากองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติที่ได้ข้างต้นแสดงว่า กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดที่สูงเป็นประโยชน์ต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน นอกจากนี้ยังมีปริมาณ โลหะหนัก ค่าความเป็นกรดค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในระดับที่เหมาะสม ดังนั้น หากนำกากเบียร์ดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินจะสามารถปลดปล่อยธาตุอาหาร เพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุ และช่วยการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของดิน ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์และอุ้มน้ำได้ดีขึ้น (Mbagwu and Ekwealor, 1990)

2. อัตราส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระถาง

เนื่องจากกากเบียร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมหลักในการขึ้นรูปกระถาง คือ กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลต์ร้อยละ 70 ซึ่งมีส่วนผสมหลักเป็นข้าวมอลต์ที่มาจากข้าวบาร์เลย์ และปลายข้าวที่เป็นส่วนผสมรองร้อยละ 30 ของวัตถุดิบธัญชาติทั้งหมด เมื่อนำกากเบียร์ดังกล่าวมาบดด้วยเครื่องบดย่อย (hammer mill) และร่อนด้วยตะแกรง (sieve) ขนาด 0.5 มิลลิเมตร และวิเคราะห์ลักษณะปรากฏ (ภาพที่ 7) จะมีส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยหยาบที่มาจากเปลือกข้าวบาร์เลย์ และส่วนอื่นๆของเมล็ดข้าวบาร์เลย์ นอกจากนี้ กากเบียร์บดที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองน้ำตาล ซึ่งอาจจะเป็นปลายข้าวหรือส่วนเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดหรือคัพพะ ดังงานวิจัยของศาสตร์ (2554) ซึ่งได้นำรำข้าวที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดมาผสมกับพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid: PLA) กลิเซอรอล และแมกนีเซียมสเตียเรต (magnesium stearate) มาผลิตเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากลักษณะปรากฏของกากเบียร์ที่มีผงละเอียดของปลายข้าว และมีเส้นใยหยาบซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและเหนียว จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นส่วนผสมหลักสำหรับการขึ้นรูปกระถางต่อไป



ภาพที่ 7 ลักษณะปรากฏของกากเบียร์ที่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

ดังนั้น ส่วนผสมในการขึ้นรูปกระถาง ได้แก่ กากเบียร์ (BSG) ดินเหนียว (CLAY) กลีเซอรอล (GLY) และพอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) โดยใช้กากเบียร์เป็นส่วนผสมหลักในปริมาณเท่ากับ 75, 100, 125 และ 150 กรัม และใช้ดินเหนียวในปริมาณ 100 กรัม พอลิไวนิลอะซิเตท 25 และ 50 กรัม โดยดินเหนียวและพอลิไวนิลอะซิเตทจะช่วยให้การยึดเกาะของส่วนผสมเมื่อขึ้นรูปเป็นกระถาง เนื่องจากดินเหนียวเมื่อเปียกน้ำจะมีสภาพเป็นพาสติกและจะแข็งแรงแ้งเมื่อแห้ง ส่วนพอลิไวนิลอะซิเตทใช้เป็นสารยึดเหนี่ยว มีโครงสร้างของหมู่อะซิเตทซึ่งเป็นหมู่อะซิเตทที่มีขั้ว มีสมบัติการยึดผิวหน้าที่ดี (อรอุษา, 2544) และช่วยให้ความเหนียวของเนื้อดินดีขึ้น (ปรีดา, 2547) นอกจากนี้ยังใช้กลีเซอรอลในปริมาณ 25 และ 50 กรัมเพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะนุ่ม ส่วนผสมเข้ากันได้ดี และช่วยเป็นตัวหล่อลื่นในการถอดแบบแม่พิมพ์ให้สะดวกด้วย

จากผลการศึกษาอัตราส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทสำหรับขึ้นรูปกระถางทั้ง 16 สูตร (ตารางที่ 6) โดยวิธีการกดอัดด้วยเครื่องกดอัดระบบไฮโดลิกพบว่า สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) (ภาพผนวกที่ จ4) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถขึ้นรูปกระถางได้ง่าย ส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเหนียวนุ่มและไม่เกิดรอยแตกที่ขอบปากของกระถาง (ภาพที่ 8 (ก)) อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการขึ้นรูปกระถางอีกอย่างคือ การถอดแบบแม่พิมพ์ออกจากตัวกระถาง ซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างของกระถางเป็นที่น่าสังเกตว่า สูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างกลีเซอรอลต่อพอลิไวนิลอะซิเตทเท่ากับ 1:2 นั้น สามารถถอดแบบแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่าสูตรที่ 12 และสูตรที่ 16 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมระหว่างกลีเซอรอลต่อพอลิไวนิลอะซิเตทเท่ากับ 2:2 อย่างไรก็ตาม สูตรผสมที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะนุ่ม แต่เมื่อนำไปขึ้นรูปกระถางพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางที่สมบูรณ์ได้คือ สูตรที่ 2 (BSG₁₅₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 4 (BSG₁₅₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 6 (BSG₁₂₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 8 (BSG₁₂₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 9 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₂₅) สูตรที่ 11 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₂₅) สูตรที่ 13 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₂₅) และสูตรที่ 15 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₂₅) ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการถอดแบบแม่พิมพ์ตัวเมีย ได้เกิดรอยแตกที่ขอบปากของกระถาง ทำให้โครงสร้างของกระถางที่ได้ไม่สมบูรณ์ (ภาพผนวกที่ จ3) นอกจากนี้ อัตราส่วนผสมสูตรที่ 1 (BSG₁₅₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₂₅) สูตรที่ 3 (BSG₁₅₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₂₅) สูตรที่ 5 (BSG₁₂₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₂₅) และสูตรที่ 7 (BSG₁₂₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₂₅) พบว่า ส่วนผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะร่วนซุย ไม่เหมาะสำหรับนำมาขึ้นรูปกระถาง (ภาพผนวกที่ จ2 (ก))

ตารางที่ 6 อัตราส่วนผสมเป็นกรัมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระถาง

สูตร ส่วนผสม	กากเบียร์ (BSG) (กรัม)	ดินเหนียว (Clay) (กรัม)	กลีเซอรอล (Gly) (กรัม)	พอลิไวนิลอะ ซิเตท (PVAc) (กรัม)	ความสามารถ ในการขึ้นรูป เป็นกระถาง
T ₁	150	100	25	25	×
T ₂	150	100	25	50	◇
T ₃	150	100	50	25	×
T ₄	150	100	50	50	◇
T ₅	125	100	25	25	×
T ₆	125	100	25	50	◇
T ₇	125	100	50	25	×
T ₈	125	100	50	50	◇
T ₉	100	100	25	25	◇
T ₁₀	100	100	25	50	✓
T ₁₁	100	100	50	25	◇
T ₁₂	100	100	50	50	✓
T ₁₃	75	100	25	25	◇
T ₁₄	75	100	25	50	✓
T ₁₅	75	100	50	25	◇
T ₁₆	75	100	50	50	✓

หมายเหตุ × แสดงถึงส่วนผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เหมาะสมที่จะนำไปขึ้นรูปกระถาง

◇ แสดงถึงส่วนผสมสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปกระถางได้

✓ แสดงถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถขึ้นเป็นรูปกระถางได้ง่าย



(ก)

(ข)

ภาพที่ 8 ตัวอย่างของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท
(ก) การขึ้นรูปกระถางที่มีโครงสร้างสมบูรณ์ (ข) กระถางหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3. สมบัติของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

3.1 สมบัติทางกายภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกระถางจากสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ ได้แก่ สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) (ตารางที่ 7) พบว่า สมบัติทางกายภาพของกระถางทั้ง 4 สูตรนั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ของค่าเฉลี่ยของความหนาตรงขอบของกระถาง อย่างไรก็ตาม พบว่า ความชื้น น้ำหนัก ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาบริเวณก้นกระถางนั้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ 16 จะมีความชื้นสูงที่สุด รองลงมา คือสูตรที่ 12 สูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 ตามลำดับ เนื่องจากสูตรที่ 16 และสูตรที่ 12 มีปริมาณส่วนผสมของกลีเซอรอล 50 กรัม ซึ่งมากกว่าสูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 เพราะกลีเซอรอลมีโครงสร้างของพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารที่มีขั้ว ชอบน้ำ จึงสามารถดูดความชื้นจากอากาศ ทำให้กระถางนั้นมีความชื้นสูงขึ้น

ตารางที่ 7 สมบัติทางกายภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

สูตรกระถาง	ความชื้น (ร้อยละ)	น้ำหนัก (กรัม)	ความสูง (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)		ความหนา (มิลลิเมตร)	
				ด้านบน (ปากกระถาง)	ด้านล่าง (ก้นกระถาง)	ขอบกระถาง	ก้นกระถาง
T ₁₀	8.796 ^a ±0.313	114.637 ^a ±8.354	85.484 ^b ±1.917	77.189 ^a ±1.825	74.053 ^b ±1.072	3.536 ^a ±0.553	3.837 ^b ±0.619
T ₁₂	10.480 ^b ±0.494	127.865 ^b ±13.896	85.987 ^b ±3.512	78.164 ^a ±1.617	74.240 ^b ±1.237	3.809 ^a ±0.223	2.738 ^a ±0.903
T ₁₄	9.406 ^a ±0.795	133.867 ^b ±6.420	86.042 ^b ±2.006	78.661 ^b ±2.566	72.992 ^a ±1.547	3.562 ^a ±0.332	4.727 ^b ±0.584
T ₁₆	14.340 ^c ±0.670	118.448 ^a ±15.796	81.886 ^a ±3.249	78.112 ^{ab} ±1.900	74.254 ^b ±1.451	3.620 ^a ±0.166	2.340 ^a ±0.485

หมายเหตุ ^{a-c} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.2 สมบัติเชิงกลของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

ก. ความต้านทานแรงกด (Compression strength)

จากการทดสอบความต้านทานแรงกดของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว ก्लीเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรของส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ (ตารางที่ 8) พบการเสียรูปที่ระดับ 20 มิลลิเมตร โดยสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดเท่ากับ 3,235.548 และ 2,722.374 นิวตัน ตามลำดับ ในขณะที่สูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีค่าความต้านทานแรงกดต่ำกว่าสองสูตรแรก (เท่ากับ 841.290 นิวตัน) เนื่องจากอัตราส่วนผสมของกระถางในสูตรที่ 6 นั้น มีปริมาณสัดส่วนของก्लीเซอรอลที่มากกว่า จึงส่งผลให้มีความชื้นของกระถางมากกว่า ทำให้โครงสร้างภายในของกระถางไม่แข็งแรง เมื่อมีแรงมากระทำจึงเกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่ากระถางตามสูตรผสมอื่นๆ ที่มีความชื้นน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาของก้นกระถางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระถางสามารถต้านทานแรงกดได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yamauchi *et al.* (2006) ที่รายงานว่า ความหนาที่เพิ่มขึ้นของกระถางกระดาษเพื่อสิ่งแวดล้อม (Eco paper pot) ตามสัดส่วนของเศษกระดาษมีผลทำให้กระถางสามารถต้านทานแรงกดได้ดีขึ้น

ข. ความต้านทานการตกกระแทก (Drop resistance)

จากการทดสอบความสามารถต้านทานแรงตกกระแทกของกระถาง โดยการปล่อยกระถางลงสู่พื้นจากระดับความสูงต่างๆ พบว่า ความต้านทานการตกกระแทกซึ่งรายงานเป็นระดับความสูงของการตกกระแทกของกระถางที่ขบก้นกระถาง และก้นกระถาง ให้ผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 8) โดยสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีความต้านทานการตกกระแทกต่ำที่สุด (68 และ 88 เซนติเมตร ตามลำดับ) ส่วนสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) เป็นสูตรที่มีความสามารถต้านทานการตกกระแทกสูงที่สุด (176 และ 192 เซนติเมตร ตามลำดับ) โดยค่าความต้านทานการตกกระแทกจากระดับความสูงชี้ให้เห็นถึงความทนทานและศักยภาพในการใช้งานของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งต้องสามารถปรากฏการณ์การตกกระแทกที่อาจเกิดขึ้นได้ในขณะใช้งานได้ดี (พรฤดี, 2552)

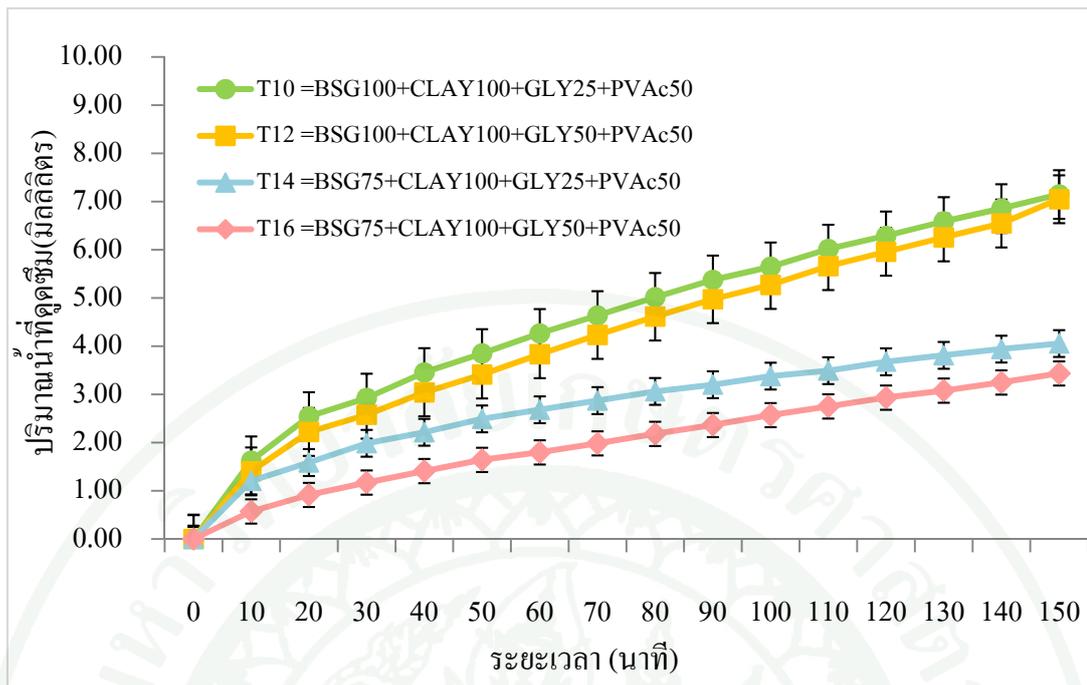
ตารางที่ 8 สมบัติเชิงกลของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

สูตร กระถาง	ความต้านทานแรงกด (นิวตัน) ณ การเสียรูประดับ 20 มิลลิเมตร	ระดับความสูงของต้านทานการตกกระแตก (เซนติเมตร)	
		ก้นกระถาง	ขอบก้นกระถาง
T ₁₀	2722.374 ^c ±726.491	142 ^b ±0.286	132 ^b ±0.192
T ₁₂	1550.908 ^b ±52.336	154 ^b ±0.445	142 ^b ±0.277
T ₁₄	3235.548 ^c ±348.154	192 ^c ±0.130	176 ^c ±0.250
T ₁₆	841.290 ^a ±79.811	88 ^a ±0.109	68 ^a ±0.148

หมายเหตุ ^{a-c} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ก. ความต้านทานการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ สามารถแสดงได้โดยปริมาณน้ำที่ดูดซึมกับเวลา (ภาพที่ 9 และตารางผนวกที่ ข1) โดยสูตรที่มีส่วนผสมของกากเบียร์ 75 กรัม ได้แก่ สูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ให้ค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำสูงกว่าสูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ที่มีส่วนผสมของกากเบียร์ 100 กรัม ส่วนผสมของกากเบียร์ที่มากกว่าทำให้ค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำต่ำลง ($p \leq 0.05$) หรือมีการดูดซึมน้ำได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยหยาบของเปลือกข้าวบาร์เลย์และผงละเอียดของปลายข้าวจากกากเบียร์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูง โดยกากเบียร์มีความจุในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ร้อยละ 330 โดยปริมาตรที่ 0.01 เมกะปาสคา (Mbagwu and Ekwealor, 1990) ซึ่งความจุในการอุ้มน้ำส่งผลถึงปริมาณน้ำที่มีความเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชและการระบายอากาศของวัสดุปลูก (เมธิน, 2536)



ภาพที่ 9 ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

4. ปริมาณธาตุอาหาร สมบัติทางเคมี และโลหะหนักจากกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

4.1 ปริมาณธาตุอาหารของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

จากการศึกษาปริมาณธาตุอาหารของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ (ตารางที่ 9) พบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของกระถางสูงที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณ โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมด ตามลำดับ

4.1.1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

กระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุด คือ ร้อยละ 2.065 ส่วนสูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด คือ ร้อยละ 1.803, 1.705 และ 1.667 ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนจะมีบทบาทสำคัญ เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน โปรตีน คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ในพืช และช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ใบและกิ่งก้าน หากมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จะทำให้พืชโตช้า ใบล่างเหลืองซีดทั้งแผ่นใบ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.1.2 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด

กระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด คือ ร้อยละ 0.150, 0.125, 0.116 และ 0.103 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสจะมีบทบาทที่สำคัญ คือ ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีนและสารอินทรีย์ที่สำคัญในพืช ที่ทำหน้าที่ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและหายใจ หากมีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จะทำให้พืชมีลำต้นแกร็น ไม่ผลิติดอกออกผล (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.1.3 ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด

กระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด คือ ร้อยละ 0.423, 0.436, 0.443 และ 0.469 ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมจะมีบทบาทที่สำคัญ คือ ช่วยสังเคราะห์น้ำตาล แป้ง และโปรตีน ช่วยส่งเสริมการเคลื่อนย้ายน้ำตาลจากใบไปยังผล ช่วยให้ผลเจริญเติบโตเร็ว แต่หากมีปริมาณโพแทสเซียมไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จะทำให้รากเจริญเติบโตช้า ลำต้นอ่อนแอ ผลไม่เติบโต (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.1.4 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด

กระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) โดยมีผลให้ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด คือ ร้อยละ 0.004, 0.013, 0.008 และ 0.004 ตามลำดับ ปริมาณแคลเซียมจะมีบทบาทที่สำคัญ คือ ช่วยในการแบ่งเซลล์ การผสมเกสร และการงอกของเมล็ด แต่หากมีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จะทำให้ใบที่เจริญใหม่ๆ หัก มีจุดดำที่เส้นใบ ตายอดไม่เจริญ รากสั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.1.5 ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด

กระถางสูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดสูงที่สุด คือ 0.042 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด คือ ร้อยละ 0.021, 0.018 และ 0.019 ตามลำดับ ปริมาณแมกนีเซียมจะมีบทบาทที่สำคัญ คือ ช่วยในการงอกของเมล็ด แต่หากมีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จะทำให้ใบแก่เหลือง และใบร่วงหล่นเร็ว (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 9 ปริมาณธาตุอาหารของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

สูตรกระถาง	%N	%P	%K	%Ca	%Mg
T ₁₀	2.065 ^b ±0.127	0.150 ^a ±0.041	0.423 ^a ±0.011	0.004 ^a ±0.013	0.021 ^a ±0.005
T ₁₂	1.803 ^a ±0.108	0.125 ^a ±0.005	0.436 ^a ±0.018	0.013 ^a ±0.014	0.042 ^b ±0.007
T ₁₄	1.705 ^a ±0.067	0.116 ^a ±0.022	0.443 ^a ±0.046	0.008 ^a ±0.014	0.018 ^a ±0.005
T ₁₆	1.667 ^a ±0.011	0.103 ^a ±0.011	0.469 ^a ±0.040	0.004 ^a ±0.007	0.019 ^a ±0.003

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 สมบัติทางเคมีของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

4.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่างของกระถางมีความสำคัญต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารต่างๆ และควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ จากผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถขึ้นรูปของทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 10) พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 โดยสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ หรือแสดงความเป็นกรดมากกว่าสูตรอื่นๆ

4.2.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: EC)

ค่าการนำไฟฟ้า หมายถึง ความเป็นเกลือของสารละลายที่อ้อมตัวรอบๆ รากพืช หรือแสดงถึงระดับความเค็ม ที่มีผลต่อการยับยั้งการดูดน้ำของพืชและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของกระถาง (ทัศนพันธุ์, 2542) จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถขึ้นรูปได้ของทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 10) มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในระดับความเค็มที่ยอมรับได้ โดยเทียบกับระดับความเค็มของดินไม่เกิน 2 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) โดยสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และให้ผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter: OM)

จากการศึกษาปริมาณอินทรีย์วัตถุของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปนี้ (ตารางที่ 10) พบว่า สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุ คือ ร้อยละ 49.086 ซึ่งมากกว่า สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และ สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) คือ ร้อยละ 48.809, 46.650 และ 46.282 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$)

4.2.4 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

จากการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของกระดางจากเบียร์เบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ (ตารางที่ 10) พบว่า สูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และ สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน คือ 16.266:1, 15.857:1 และ 15.789:1 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) ซึ่งมากกว่าสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) คือ 13.772:1 อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของกระดางทั้ง 4 สูตรมีค่าต่ำกว่า 20:1 แสดงถึงความสามารถของการย่อยสลายกระดางได้ง่าย และการปลดปล่อยของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 10 สมบัติทางเคมีของกระดางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

สูตรกระดาง	pH (1:1)	EC (1:5) เดซิซีเมนต่อเมตร	%OM	C/N
T ₁₀	3.870 ^{ab} ±0.299	1.161 ^a ±155.347	48.809 ^{ab} ±1.286	13.772 ^a ±0.907
T ₁₂	4.233 ^b ±0.029	1.161 ^a ±278.004	49.086 ^b ±1.748	15.857 ^b ±0.884
T ₁₄	3.603 ^a ±0.270	1.285 ^a ±23.671	46.282 ^a ±0.469	15.789 ^b ±0.592
T ₁₆	4.237 ^b ±0.040	1.614 ^b ±39.803	46.650 ^{ab} ±1.684	16.266 ^b ±0.695

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แม้ว่ากระดางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ จะมีปริมาณธาตุหลักและคุณสมบัติทางเคมีเหมาะสม แต่สิ่งที่จะต้องพิจารณาในงานวิจัยนี้คือ ปริมาณเหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ทั้งหมด ซึ่งเป็นโลหะหนัก ที่อาจมีการปนเปื้อนจากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือเครื่องมือต่างๆ ที่เกิดขึ้น

จากการผลิต ซึ่งอาจเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืชเมื่อมีการนำกระถางไปเพาะปลูกพืช หรือเมื่อเกิดการย่อยสลายไปตามธรรมชาติ อาจจะเป็นต้นตอของดินและสิ่งแวดล้อม

4.3 ปริมาณโลหะหนักของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

จากการศึกษาปริมาณโลหะหนักของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ (ตารางที่ 11) พบว่า ปริมาณเหล็กทั้งหมดของกระถางสูงที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณสังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ

4.3.1 ปริมาณเหล็กทั้งหมด

ปริมาณเหล็กทั้งหมดของกระถางตามสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มากที่สุด คือ 12,133.333 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีมากกว่าสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ซึ่งมีผลให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดคือ 9,301.000, 7,758.667 และ 6,737.333 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กทั้งหมดของกระถางทั้ง 4 สูตร มีค่าในระดับที่มากเกินไปเกินเกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อพืช คือ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Otost *et al.*, 2008) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจากอุปกรณ์เครื่องมือ เช่น แบบแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าและเคลือบโคบอล ซึ่งขั้นตอนหลังการขึ้นรูปกระถางได้นำเอาแม่พิมพ์ตัวผู้พร้อมกระถางที่ขึ้นรูปแล้วอบในอุโมงค์ลมร้อน ซึ่งความร้อนอาจจะทำให้สารประกอบที่อยู่บนตัวแบบพิมพ์ปนเปื้อนออกมาได้ นอกจากนี้ อาจมาจากดินเหนียวที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะในการขึ้นรูปกระถาง โดยทั่วไปมีปริมาณเหล็กออกไซด์ร้อยละ 6.4 (นงลักษณ์, 2547) อย่างไรก็ตาม การพิจารณาโลหะหนักนั้นจะต้องดูสองด้านคือ ปริมาณและรูปของสารประกอบที่มีอยู่ โดยถือว่าชนิดของธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะหนัก มีความสำคัญกว่าปริมาณที่วัดได้ ในกรณีนี้โลหะหนักซึ่งเป็นธาตุอาหารประเภทจุลธาตุ อาจจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ (ยงยุทธ และคณะ, 2551) ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการละลายของธาตุพิษสภาพความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.3.2 ปริมาณสังกะสีทั้งหมด

ปริมาณสังกะสีทั้งหมดของกระถาง ตามสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) คือ 48.667, 45.667, 46.933 และ 45.200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ($p \geq 0.05$) โดยปริมาณเหล็กทั้งหมดของกระถางทั้ง 4 สูตรมีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ให้มีในบรรจุภัณฑ์ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 6400 คือ 1400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ชนาวดี, 2549)

4.3.3 ปริมาณตะกั่วทั้งหมด

ปริมาณตะกั่วทั้งหมดของกระถางตามสูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) เท่ากับ 8.200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ที่มีค่าเท่ากับ 9.200, 9.400 และ 10.300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณตะกั่วทั้งหมดของกระถางทั้ง 4 สูตรมีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ให้มีในบรรจุภัณฑ์ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 6400 คือ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ชนาวดี, 2549)

4.3.4 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของกระถาง ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สูตรที่ 12 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) สูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีผลให้ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด คือ 0.167, 0.133, 0.200 และ 0.200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของกระถางทั้ง 4 สูตร มีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ให้มีในบรรจุภัณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM D6400 คือ 17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ชนาวดี, 2549)

ตารางที่ 11 ปริมาณโลหะหนักของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

สูตร กระถาง	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
T ₁₀	6,737.333 ^a ±1,006.292	48.667 ^a ±0.814	9.200 ^b ±0.608	0.167 ^a ±0.056
T ₁₂	7,758.667 ^{ab} ±752.276	45.667 ^a ±1.850	8.200 ^a ±0.173	0.133 ^a ±0.057
T ₁₄	12,133.333 ^b ±1,719.806	46.933 ^a ±1.222	10.300 ^c ±0.265	0.200 ^a ±0.000
T ₁₆	9,301.000 ^c ±659.569	45.200 ^a ±2.688	9.400 ^b ±0.557	0.200 ^a ±0.000

หมายเหตุ ^{a-c} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากสมบัติต่างๆของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 4 สูตร แสดงให้เห็นว่า สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀; CLAY₁₀₀; GLY₂₅; PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅; CLAY₁₀₀; GLY₂₅; PVAc₅₀) เป็นสูตรที่มีความแข็งแรงที่สามารถต้านทานแรงกดและแรงตกกระแทกได้มากกว่าอีก 2 สูตร จึงคัดเลือกสูตรดังกล่าวมาทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพต่อไป

5. ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (อ้างอิงตาม ASTM 5338 และ ISO 14855-1)

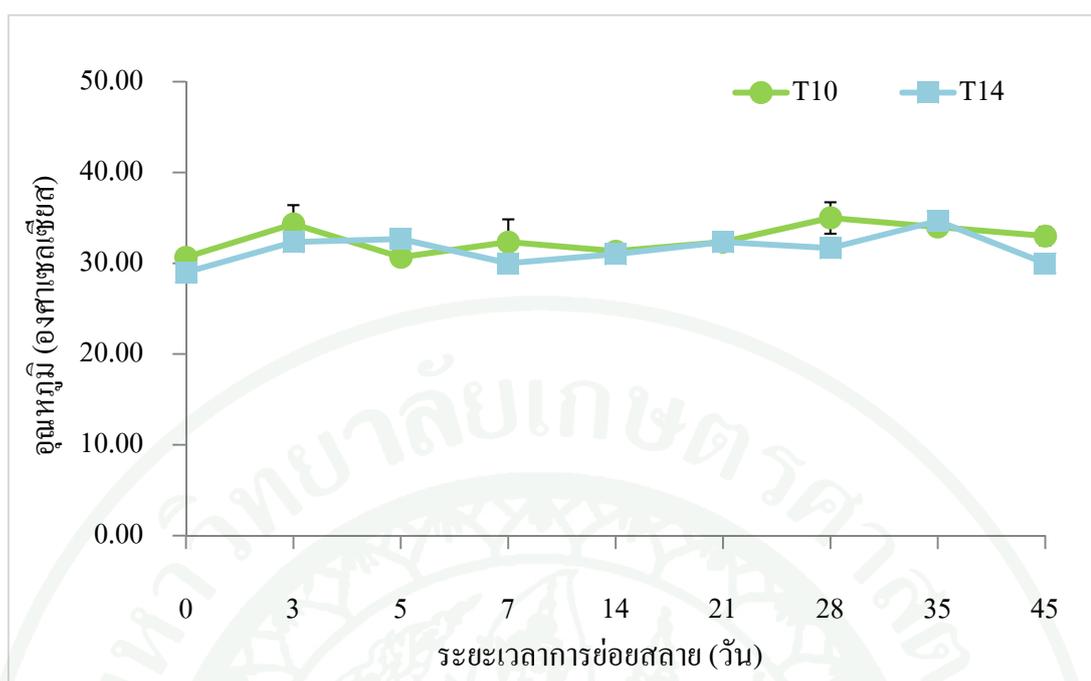
งานวิจัยนี้ทดสอบความสามารถการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยระบบ cumulative measurement respirometric (CMR) โดยวิธีของ Kale *et al.* (2007) และดัดแปลงจาก Kijchavengkul *et al.* 2006 (ภาพผนวกที่ ๗1) ซึ่งหาค่าร้อยละของการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางด้วยการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายของกระถางเปรียบเทียบกับเซลลูโลส (cellulose) และแหล่งจุลินทรีย์ (inoculum) ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงบวก (positive controls) และทดสอบแบบไร้ชิ้นวัสดุตัวอย่าง (blank) มีระยะเวลาทำการย่อยสลายเท่ากับ 45 วัน โดยวัสดุตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ (ก่อนการย่อยสลายทางชีวภาพ) มีสมบัติดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 สมบัติของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

วัสดุ	สมบัติ		
	อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)	น้ำหนัก (กรัม)
เซลลูโลส (Cellulose)	95.772±0.681	4.288±0.440	10.241±0.075
แหล่งจุลินทรีย์ (Inculum)	2.706±0.110	22.547±0.051	7000±0.000
กระถางสูตรที่ T ₁₀	48.809±1.286	8.796±0.399	107.40±9.568
กระถางสูตรที่ T ₁₄	46.282±0.469	9.406±0.856	129.50±5.909

5.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการย่อยสลายทางชีวภาพ

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายของกระถางที่มีส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอร์อล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) แสดงไว้ดังภาพที่ 10 และตารางผนวกที่ ค1 พบว่าในช่วงระยะเวลา 7 วันนั้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายของกระถางสูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 มีค่าระหว่าง 30.67-34.33 และ 29.00-32.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่หลังจากการย่อยสลายดำเนินไปแล้ว 28 วัน กระถางสูตรที่ 10 มีอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นเป็น 35.00 องศาเซลเซียส และมีค่ามากกว่ากระถางสูตรที่ 14 ที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 31.67 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า กระถางทั้ง 2 สูตร เริ่มเกิดการย่อยสลาย อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการย่อยสลายมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลา 45 วัน อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทางกายภาพ และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งในช่วงอุณหภูมิที่ 25-35 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบโดยทั่วไปตามธรรมชาติ หากอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 52-60 องศาเซลเซียส จะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น (ธนาวดี, 2549)

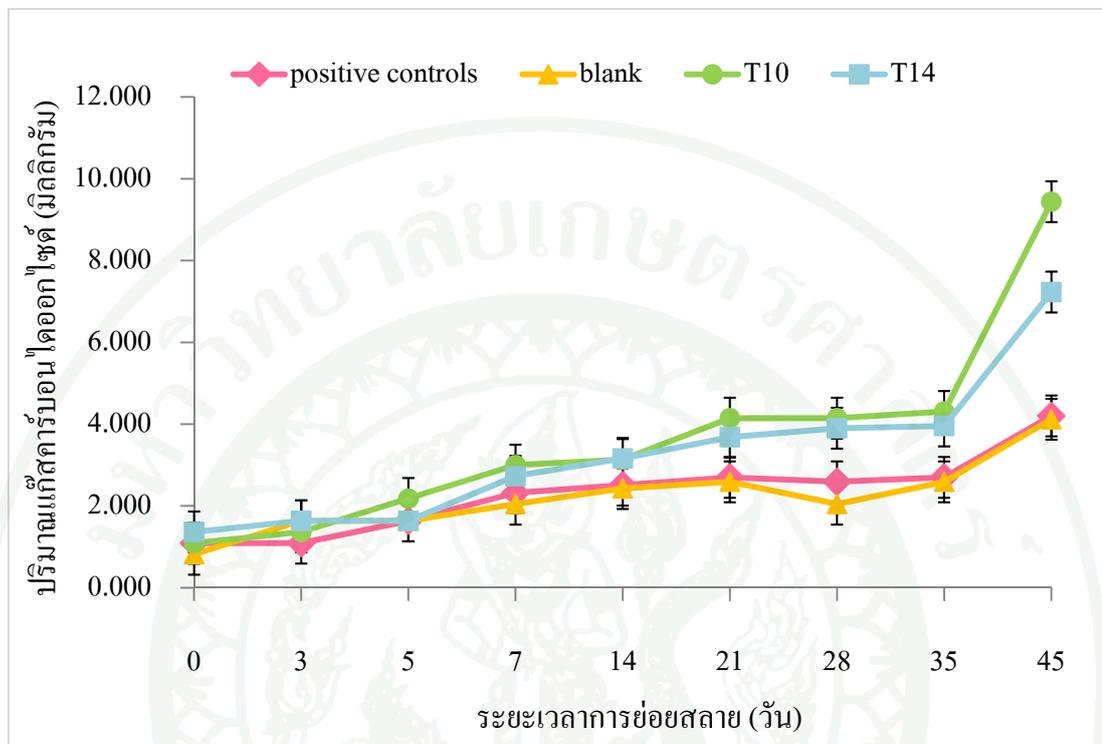


ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการย่อยสลายทางชีวภาพ ระยะเวลา 45 วัน ของ กระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T₁₀ และ T₁₄

5.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากการศึกษาการย่อยสลายของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀; CLAY₁₀₀; GLY₂₅; PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅; CLAY₁₀₀; GLY₂₅; PVAc₅₀) โดยทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 45 วัน และเก็บปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทุกสัปดาห์เพื่อวิเคราะห์การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษ (ภาพที่ 11 และตารางผนวกที่ ค2) พบว่า ในช่วงระยะเวลา 7 วันนั้น ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถังทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงบวก ถึงทดสอบควบคุมแบบไร้ชิ้นวัสดุตัวอย่าง และถังทดสอบของกระดาษสูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แต่หลังการย่อยสลายดำเนินไปแล้ว 21 วัน ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังทดสอบของกระดาษสูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 ให้ค่าที่สูงกว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถังทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงบวกและถังทดสอบควบคุมแบบไร้ชิ้นวัสดุตัวอย่าง ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระดาษของทั้งสองสูตรมีส่วนผสมของกากเบียร์ที่มีปลายข้าวและเส้นใยหยาบเกิดการย่อยสลาย และกลีเซอรอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มี

สมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) เอื้อให้กระบวนการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ดีขึ้น และเป็นปัจจัยสำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพและการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ (ชนาวดี, 2549)

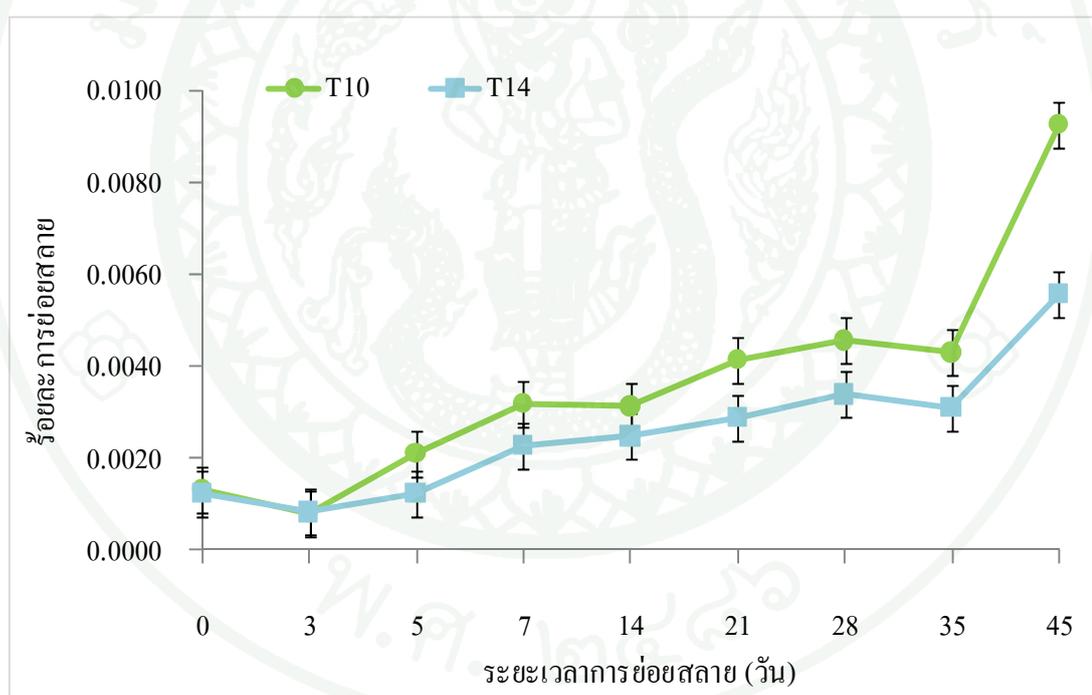


ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างการย่อยสลาย ระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T_{10} และ T_{14}

5.3 การย่อยสลายทางชีวภาพของกระถาง

จากผลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของกระถางสูตรที่ 10 (BSG_{100} ; $CLAY_{100}$; GLY_{25} ; $PVAc_{50}$) และสูตรที่ 14 (BSG_{75} ; $CLAY_{100}$; GLY_{25} ; $PVAc_{50}$) ระหว่างการย่อยสลาย 45 วัน ดังที่กล่าวข้างต้น เมื่อนำมาหาค่าการย่อยสลายทางชีวภาพโดยคำนวณเทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงบวกและถังทดสอบแบบไร้ชี้นวัสดุตัวอย่าง (ภาพที่ 12 และตารางผนวกที่ 3) พบว่า ในช่วงระยะเวลา 7 วันแรก กระถางสูตรที่ 10 และสูตรที่ 14 มีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพเท่ากับร้อยละ 0.0032 และ 0.0023 แต่เมื่อผ่านไป 14 วัน พบว่า กระถางสูตรที่ 10 มีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพมากกว่าสูตรที่ 14 และมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อผ่านไปเป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่า กระถางสูตรที่ 10 มีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพเท่ากับร้อยละ

0.0093 ซึ่งให้ค่าสูงขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ 14 (ร้อยละ 0.0056) จะเห็นได้ว่า กระดาษที่มีส่วนผสมของกากเบียร์ที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าการย่อยสลายที่สูงขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในงานวิจัยนี้ ค่าการย่อยสลายที่เกิดขึ้นต่ำมากและเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบที่ตัวอย่างเริ่มต้นมีขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยทำให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายได้น้อย นอกจากนี้ ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์ที่ในการทดสอบมีขนาดใหญ่ จะมีความพรุนสูง ทำให้แหล่งจุลินทรีย์นั้นแห้งง่าย ส่งผลให้ความชื้นไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (ชนาวดี, 2549; ยงยุทธ และคณะ, 2551; พรฤดี, 2552) นอกจากนี้ อาจมาจากระยะเวลาในการย่อยสลายของกระดาษสั้นเกินไป ซึ่งในงานวิจัยของพรฤดี (2552) ได้ใช้ระยะเวลาการย่อยสลายกระดาษจากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนเยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียจนถึง 3 เดือน และในงานวิจัยของ Sasaki and Baba (1998) ใช้ระยะเวลาการย่อยสลายกระดาษจากเต้าหู้จากกระบวนการผลิตนมถั่วเหลืองนานถึง 2 เดือน ซึ่งให้ค่าการย่อยสลายมากกว่าร้อยละ 30



ภาพที่ 12 การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตร T_{10} และ T_{14} ระยะเวลา 45 วัน

จากผลการทดลองยังพบว่า เซลลูโลสที่ใช้สำหรับการทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงบวก ให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ (ตารางที่ 14) คือ ร้อยละ 4.042 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ว่าเซลลูโลสต้องย่อยสลายได้อย่างน้อยร้อยละ 70 ภายในระยะเวลา 45 วัน

(ชนาวดี, 2549) หรือต้องย่อยสลายเซลลูโลสได้ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ภายในระยะเวลา 72 วัน (Mohee *et al.*, 2008) จากค่าการย่อยสลายของเซลลูโลสในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า การทำงานของจุลินทรีย์ในแหล่งจุลินทรีย์ยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่ชัดเจน

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาค่าการย่อยสลายทางชีวภาพของกระดางจากกากเปียร์ ดินเหนียว กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตร ในระยะเวลา 45 วัน ในเทอมของร้อยละน้ำหนักของกระดางที่หายไป (weight loss) (ตารางที่ 13) พบว่า กระดางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ ร้อยละ 19.523 โดยน้ำหนัก และมีค่ามากกว่าสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) ซึ่งมีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพเท่ากับร้อยละ 17.436 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่า ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพที่หาในเทอมของร้อยละน้ำหนักของกระดางที่หายไปและค่าการย่อยสลายทางชีวภาพในเทอมของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ กระดางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีที่สุด เนื่องจากสูตรที่ 10 มีปริมาณกากเปียร์มากกว่าสูตรที่ 14 กากเปียร์ประกอบด้วยเส้นใยหยาบ ปลายข้าว และส่วนเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดของข้าวบาร์เลย์ เป็นสารประกอบจำพวกพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน (protein) และแป้ง (starch) (กาญจนา, 2549) มีสมบัติชอบน้ำ และโครงสร้างโมเลกุลมีเฮเทอโรอะตอม (hetero atom) เป็นส่วนประกอบ ได้แก่ อะตอมของธาตุออกซิเจน ไนโตรเจน ซึ่งอยู่บนโครงสร้างหลักของสายพอลิเมอร์ และมีพันธะเอไมด์ ซึ่งง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการแตกหักของสายพอลิเมอร์ น้ำหนักของโมเลกุลเล็กลงจนละลายได้ดีน้ำและแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ (ชนาวดี, 2549) ดังนั้น หากยังมีปริมาณของกากเปียร์ในส่วนผสมของกระดางมาก ยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีขึ้น

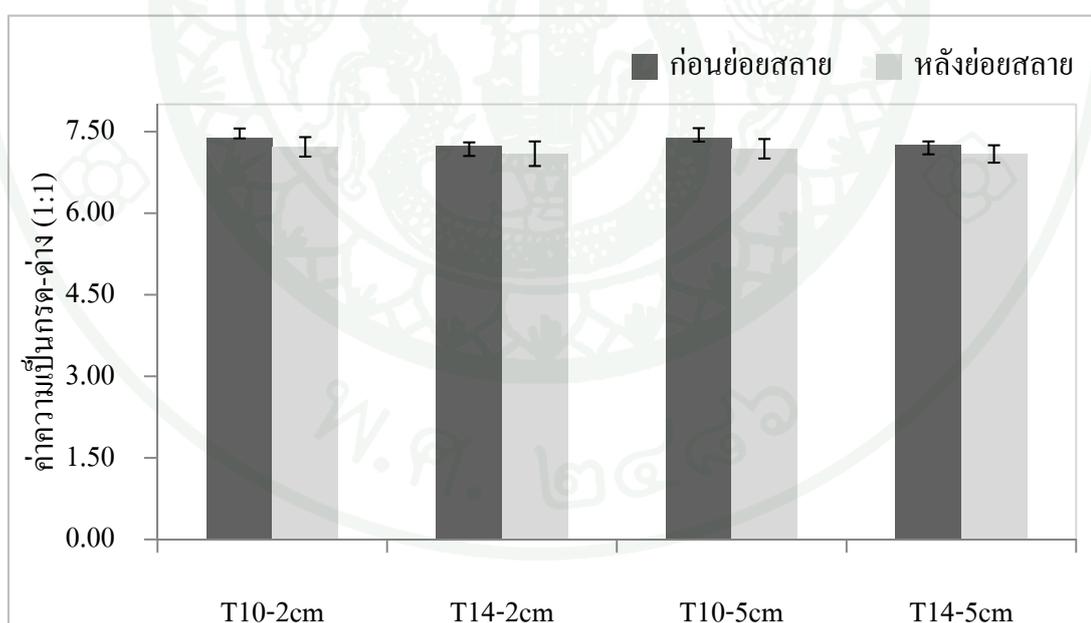
ตารางที่ 13 น้ำหนักของวัสดุตัวอย่างที่หายไปหลังจากการย่อยสลายทางชีวภาพ 45 วัน

วัสดุที่ใช้ทดสอบ	น้ำหนัก ก่อนทดสอบ (กรัม)	น้ำหนัก หลังทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (Weight loss) (กรัม)	ร้อยละของการ ย่อยสลาย
เซลลูโลส	10.241	9.827	0.415	4.042
กระดางสูตรที่ T ₁₀	107.400	86.188	21.212	19.523
กระดางสูตรที่ T ₁₄	129.500	106.921	22.579	17.436

6. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุอาหารของดินก่อนและหลังการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

6.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน

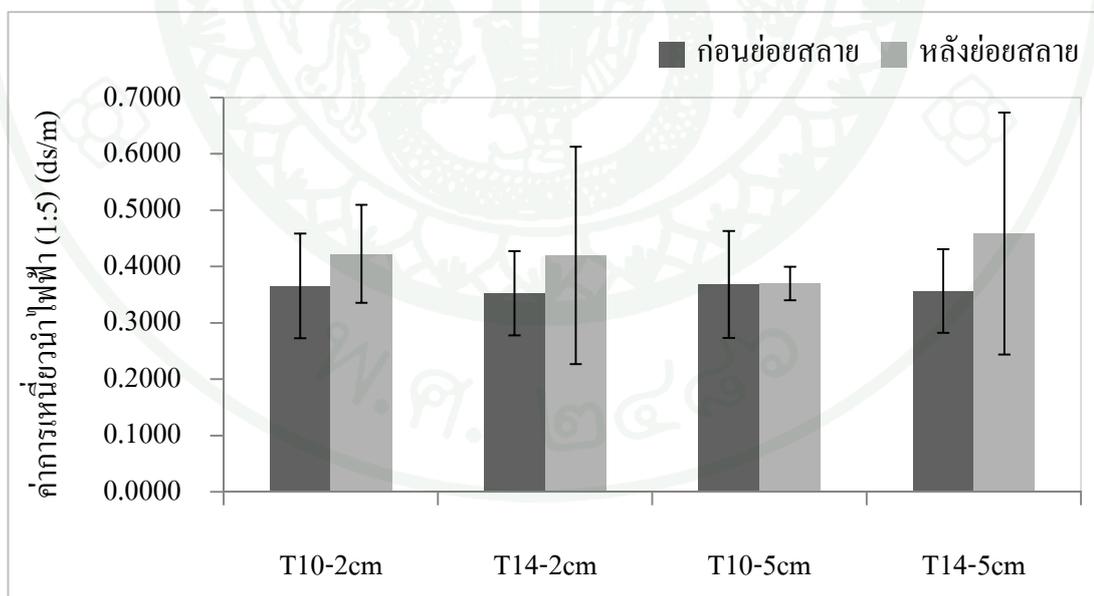
จากการศึกษาการย่อยสลายกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 13 และตารางผนวกที่ 1) พบว่า ก่อนการทดสอบย่อยสลายดินมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7.23-7.38 ภายหลังจากย่อยสลายของกระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) เป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในช่วง 7.09-7.22 ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อย และให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) การที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่มีค่าลดลงเล็กน้อยนั้น อาจเนื่องมาจากกรดอินทรีย์เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของอินทรีย์สารในช่วงแรก (ยงยุทธ และคณะ, 2551) ซึ่งมีผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดลงเช่นกัน และค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการย่อยสลายที่นานขึ้น (พรฤดี, 2552)



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

6.2 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของดิน

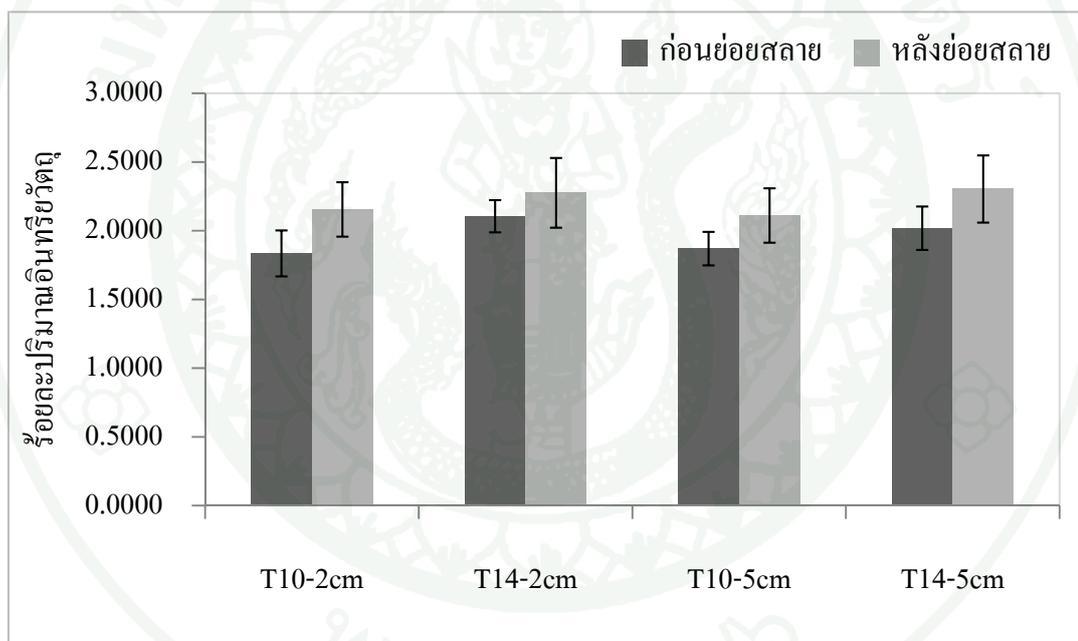
จากการศึกษาการย่อยสลายกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 14 และตารางผนวกที่ 2) พบว่า ก่อนการทดสอบย่อยสลาย ดินมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.352 -0.368 เดซิซีเมนต่อเมตร ภายหลังจากการย่อยสลายของกระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) เป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในช่วง 0.369-0.458 เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ($p \geq 0.05$) การนำไฟฟ้าของดินที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยภายหลังจากการย่อยสลายนั้น อาจเนื่องมาจากการปลดปล่อยไอออนต่างๆออกมาระหว่างกระบวนการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าของดินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ของวัสดุเพิ่มขึ้นและมีไอออนบางตัวที่หายไป หรืออาจจะมาจากความเข้มข้นของไอออนที่เพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร เช่น ไนเตรท (Montemurro *et al.*, 2009) และการนำไฟฟ้าของดินจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย่อยสลายที่นานขึ้น (พรฤดี, 2552)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

6.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) ในดิน

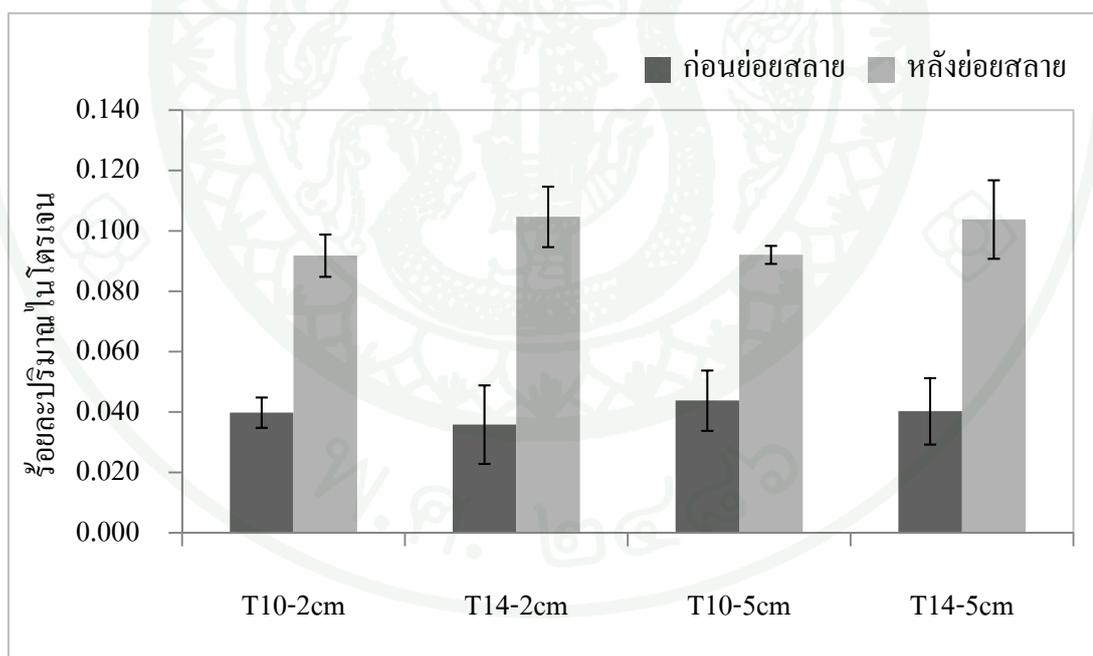
จากการศึกษาการย่อยสลายกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 16 และตารางผนวกที่ 3) พบว่า ก่อนการทดสอบการย่อยสลาย ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุระหว่างร้อยละ 1.835-2.106 แต่ภายหลังการย่อยสลายของกระถางสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) เมื่อผ่านไปเป็นระยะเวลา 45 วัน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น โดยการย่อยสลายของกระถางสูตรที่ 14 บริเวณรอบกระถางที่ระยะห่าง 2 และ 5 เซนติเมตร มีผลทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นมากที่สุด เท่ากับร้อยละ 2.276 และ 2.303 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วันของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

6.4 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

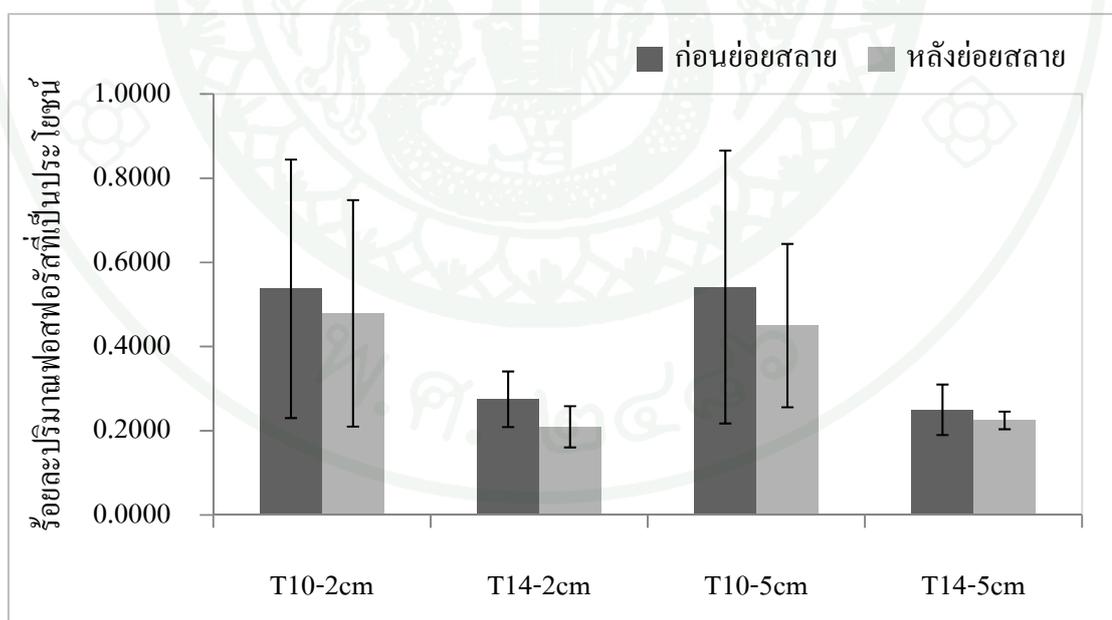
จากการศึกษาการย่อยสลายกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระดาษ 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 17 และตารางผนวกที่ 4) พบว่า ก่อนการทดสอบการย่อยสลาย ดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดระหว่างร้อยละ 0.036-0.044 แต่ภายหลังการย่อยสลายของกระดาษ สูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยการย่อยสลายของกระดาษสูตรที่ 14 บริเวณรอบกระดาษที่ระยะห่าง 2 และ 5 เซนติเมตร มีผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ ร้อยละ 0.105 และ 0.104 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ของกระดาษจะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาด้วย จึงอาจมีผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นได้ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย่อยสลายที่นานขึ้น (พรฤดี, 2552)



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระดาษ

6.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

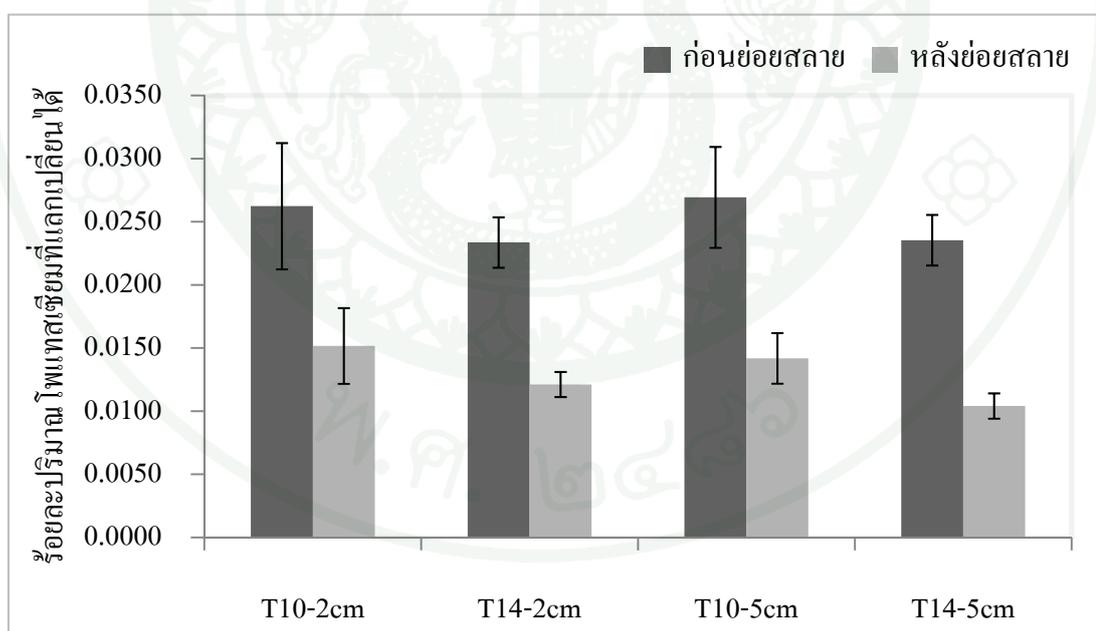
จากการศึกษาการย่อยสลายกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 18 และตารางผนวกที่ 5) พบว่า ก่อนการทดสอบย่อยสลาย ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0.275-0.538 แต่ภายหลังการย่อยสลายของกระถางทั้ง 2 สูตร เป็นระยะเวลา 45 วัน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของพรฤดี (2552) ซึ่งรายงานว่า การย่อยสลายบรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนปาล์มและกากตะกอนเชื้อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลา 2 –3 เดือน ให้ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมา ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่ให้ผลตรงข้ามอาจเนื่องมาจากปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น รูปร่างและชนิดของฟอสฟอรัสในดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และค่าความเป็นกรดด่างในดิน (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

6.6 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากการศึกษาการย่อยสลายกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทของทั้ง 2 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัวอย่างดิน ณ บริเวณรอบกระถาง 2 และ 5 เซนติเมตรถูกสุ่มเพื่อตรวจสอบผลกระทบหลังการย่อยสลาย (ภาพที่ 19 และตารางผนวกที่ 6) พบว่า ก่อนการทดสอบย่อยสลาย ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0.023-0.027 แต่ภายหลังการย่อยสลายของกระถางของทั้ง 2 สูตร ปริมาณของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลง ($p \leq 0.05$) ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของพรฤดี (2552) ซึ่งรายงานว่า การย่อยสลายของกระถางจากกากตะกอนปาล์มและกากตะกอนเชื้อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลา 2 –3 เดือน มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัสดุมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมา ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น และสภาพการย่อยสลายแบบขึ้นรคน้ำทุก 7 วันนั้น ให้การปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาในปริมาณที่มากกว่าสภาพการย่อยสลายแบบน้ำขัง ซึ่งโพแทสเซียมที่ได้มาจากสารละลายดินที่อยู่ในรูปของการชะล้าง (leaching)



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของกากเบียร์ พบว่า กากเบียร์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคืบสำหรับกระถางปลูกต้นไม้ได้โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทสำหรับการขึ้นรูปเป็นกระถาง การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารสมบัติทางเคมี และสมบัติเชิงกล พร้อมทั้งความสามารถด้านการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางสามารถสรุปประเด็นสำคัญจากผลการทดลองได้ดังนี้

1. กากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลท์ร้อยละ 70 และปลายข้าวร้อยละ 30 ของวัสดุคืบัญชาติทั้งหมด มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดที่สูงกว่ากากเบียร์ที่มีส่วนผสมของข้าวมอลท์ร้อยละ 100 และมีปริมาณโลหะหนัก ค่าความเป็นกรดค่าการนำไฟฟ้า อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เหมาะสมนำมาใช้เป็นส่วนผสมหลักสำหรับขึ้นรูปกระถาง

2. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทสำหรับการขึ้นรูปกระถาง โดยการกดอัตรระบบไฮดรอลิก คือ กากเบียร์ที่มีสัดส่วนในปริมาณ 75 และ 100 กรัม ดินเหนียว 100 กรัม พอลิไวนิลอะซิเตทและกลีเซอรอล 25 และ 50 กรัม ได้แก่ สูตรที่ 10 ($BSG_{100} : CLAY_{100} : GLY_{25} : PVAc_{50}$) สูตรที่ 12 ($BSG_{100} : CLAY_{100} : GLY_{50} : PVAc_{50}$) สูตรที่ 14 ($BSG_{75} : CLAY_{100} : GLY_{25} : PVAc_{50}$) และสูตรที่ 16 ($BSG_{75} : CLAY_{100} : GLY_{50} : PVAc_{50}$) โดยสมบัติทางกายภาพของกระถางที่ได้จากทั้ง 4 สูตรนั้นพบว่า ความหนาของขอบกระถางมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีความชื้นที่แตกต่างกัน โดยกระถางที่มีปริมาณสัดส่วนของกลีเซอรอล 50 กรัมจะให้ปริมาณความชื้นสูงสุด นอกจากนี้ กระถางทั้ง 4 สูตร มีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดสูง แต่มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ในบรรจุภัณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM D6400

3. ความต้านทานแรงกด แรงตกระแทกของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถขึ้นรูปได้สูตรที่ 10 ($BSG_{100} : CLAY_{100} : GLY_{25} : PVAc_{50}$) และสูตรที่ 14 ($BSG_{75} : CLAY_{100} : GLY_{25} : PVAc_{50}$) เป็นสูตรที่มีความแข็งแรง สามารถต้านทานแรงกดและ

แรงตกระแตกได้สูง ในขณะที่กระถางสูตรที่ 16 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₅₀: PVAc₅₀) มีความต้านทานแรงกดและแรงตกระแตกน้อยที่สุด แต่มีความต้านทานการดูดซึมน้ำได้สูงที่สุด

4. การเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถขึ้นรูปได้ในระยะเวลา 45 วันของสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) พบว่า กระถางสูตรที่ 10 สามารถย่อยสลายได้ดีที่สุด โดยมีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพในเทอมที่เปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.0093 และมีค่าการย่อยสลายทางชีวภาพที่หาในเทอมของร้อยละน้ำหนักของกระถางที่หายไปเท่ากับ 19.523 โดยน้ำหนัก ซึ่งทั้งสองวิธีให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพไปในทิศทางเดียวกัน คือ กระถางที่มีส่วนผสมของกากเบียร์มากสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี

5. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรที่ 10 (BSG₁₀₀: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) และสูตรที่ 14 (BSG₇₅: CLAY₁₀₀: GLY₂₅: PVAc₅₀) หลังจาก 45 วัน พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และค่าการนำไฟฟ้าในดินมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้และค่าความเป็นกรด-ด่างในดินมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์โดยการนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อผลิตเป็นกระถางที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการทดแทนการใช้กระถางพลาสติก อย่างไรก็ตาม อาจพบข้อจำกัดบางประการที่ยังต้องพัฒนาและปรับปรุงต่อไปดังนี้

1. ส่วนผสมของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่ใช้ กลิเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้ส่วนผสมนิ่ม และช่วยเป็นตัวหล่อลื่นถอดแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลที่มากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพสารยึดเกาะลดลง ดังนั้นควรปรับปริมาณหรือเปลี่ยนพลาสติกไซเซอร์และหาสารที่มีคุณสมบัติในการช่วยถอดกระถางออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย เช่น แมกนีเซียมสเตียเรต

2. การขึ้นรูปกระดางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทด้วยแม่พิมพ์เหล็กที่เคลือบด้วยโคบอล พบว่า ขั้นตอนการถอดกระดางเกิดเกิดสูญญากาศแม่พิมพ์ตัวเมีย และตัวผู้ที่ด้านล่างของกระดางทำให้ถอดกระดางออกได้ยาก รูปร่างของภาชนะบิดเบี้ยวไป หากต้องการขึ้นรูปกระดางที่มีความลึกและส่วนผสมที่มีความชื้นหรือสารยึดเหนี่ยวที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ควรออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ให้มีช่องว่างของอากาศระหว่างแม่พิมพ์และใช้ปืนพาสเตอร์เป็นวัสดุในการผลิตแม่พิมพ์ซึ่งวัสดุนี้มีสมบัติช่วยในการดูดความชื้นออกจากกระดางที่ขึ้นรูปทำให้ง่ายต่อการถอดกระดาง

3. การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาง โดยใช้วิธีการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ค่าการย่อยสลายของกระดางน้อยมาก ซึ่งมาจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกระจายออกไปตามช่องว่างของถังทดสอบและช่องว่างของดิน ดังนั้น หากจะใช้วิธีการวัดค่าการย่อยสลายทางชีวภาพที่อยู่ในรูปของเทอมที่เทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ควรออกแบบถังทดสอบหรือระบบให้เป็นระบบปิดควบคุมสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพ และควรศึกษาระยะเวลาการย่อยสลายของกระดางเพิ่มขึ้นเป็น 1, 2 และ 3 เดือน เพื่อดูแนวโน้มการย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น

4. สาเหตุของการย่อยสลายของกระดางและเซลล์โลสได้น้อย มาจากการทำงานของจุลินทรีย์ในแหล่งจุลินทรีย์ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้การทดสอบให้ผลที่ไม่ถูกต้องดังที่คาดไว้ ดังนั้นควรเปลี่ยนแหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบใหม่ และควรปรับเปลี่ยนขนาดของชั้นวัสดุตัวอย่างให้เป็นชั้นที่เล็กลง

5. ความสามารถในการดูดซับความชื้นและน้ำได้ดีของกระดางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตททำให้กระดางเสียรูปร่างง่าย หากนำไปใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกต้นไม้ที่มีการรดน้ำเป็นประจำ ดังนั้น ควรศึกษาสารเติมแต่งหรือสารเคลือบที่ช่วยในการต้านทานน้ำได้ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของกระดางก่อนลงแปลงการเพาะปลูก

6. ควรทดสอบการนำไปใช้ประโยชน์ของกระดางสำหรับการเพาะปลูกกล้าต้นไม้ พร้อมทั้งศึกษารูปร่างและความคงทนของกระดางก่อนและหลังไปลงแปลงเพาะปลูกว่ามีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิตที่ได้หรือไม่

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กาญจนา อินทรศิลป์. 2549. การเตรียมผลิตภัณฑ์โปรตีนจากกากธัญชาติของการผลิตเบียร์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2538. **ปฐพีเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

งามทิพย์ กุวัชรอม และสายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2540. รายงานผลการวิจัยประจำปี 2540
ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2540 โครงการวิจัยรหัสพิเศษ 16.40. 8 หน้า.

จิตวรรณ เครือคำ และศิริลักษณ์ แสนโกศล. 2549. การประยุกต์ใช้กากเบียร์ในขนมปังโฮลวีท.
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร,
มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.

คุณณี ธนะบริพัฒน์. 2538. **จุลชีววิทยาอุตสาหกรรมเกษตร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. โครงการตำรา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ทัศนพันธ์ุ กุศลสถิต. 2542. **ความเป็นไปได้ในการใช้เมล็ดดินเผาเป็นวัสดุปลูก**. ภาควิชาพืชสวน
คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ จงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2551. **คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช**.
ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชนาวดี ลีจากภัย. 2549. **พลาสติกย่อยสลายได้ เพื่อสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท ไทยเอฟเฟลท
สตูดิโอ จำกัด, กรุงเทพฯ.

ธรรมรักษ์ ศรีมารุต และ อนันต์ เงินประเสริฐ. 2542. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิต
ต้นแบบภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อเปลือกข้าวโพด. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

นงลักษณ์ บรรยงวิชัย. 2547. การผลิตกระถางผักตบชวา. *วิทยาศาสตร์บริการ* 52 (164): 4-6.

นิรนาม. 2552. กระถางต้นไม้จากขุยมะพร้าว ไอเดียลดโลกร้อน. ASTV ผู้จัดการ. แหล่งที่มา:

<http://www.openbiz.in.th/business-ideas/161.html>, 10 สิงหาคม 2552

ประสิทธิ์ ชัยเสนา, มุกดา สุขสวัสดิ์, วาสนา ชัยเสนา และฤทธิธณ สิงห์ดวง. 2546. รายงาน
ผลงานวิจัยประจำปี 2546. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินผลประโยชน์ประจำปี 2546. 27 หน้า.

ปราณี วราสวัสดิ์. 2541. คู่มือปฏิบัติการเคมีอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรม
และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. เซรามิกซ์. พิมพ์ครั้งที่ 5. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พรฤดี สงวนสุข. 2552. การพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอน
เยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับกล้าไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภัทสร่า มณีศรีรัชฎ์. 2543. การปรับปรุงคุณสมบัติทางการบรรจุของวัสดุขึ้นรูปจากแป้งมัน
สำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เมธิน ศิริวงศ์. 2536. อิทธิพลของวัสดุปลูก ภาชนะปลูก และปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของ
มะเขือเทศพันธุ์สีดา มก. ในระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วงศ์ผกา วงศ์รัตน์ และ ปารีชาติ ธาราพัตราพร. 2452. การศึกษาบรรจุภัณฑ์จากผักตบชวา.
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

ศิริวัลย์ รัตนาคินทร์. 2530. การใช้กากเหลือจากอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่บบางชนิดแทน
วัตถุดิบอาหารเพื่อเลี้ยงปลานิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศาสตร์ เพื่อองเกษตร. 2554. ภาชนะบรรจุภัณฑ์จากรำข้าว. เกษตรกรรมธรรมชาติ 51 (2): 15-19.

ศรีไฉล ขุนทนต์. 2546. สมบัติของดินเหนียวที่ใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบหัตถกรรมพื้นบ้านภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สินชัย แซ่ตั้ง. 2543. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตต้นแบบภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อตะไคร้หอม. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

สุนันทา ชมรุณี. 2550. การวิเคราะห์ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์. สำนักงานวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สมจิต สุรพัฒน์, อรอนงค์ นัยวิกุล, วรณิ จิรภาคยกุล และเนื่อทอง วนานูวัช. 2549. คู่มือปฏิบัติการรายวิชา 052415. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2532. เคมิษฐ์อาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอุษา สรวารี. 2544. สารเคลือบ (สี วานิลิน และแล็กเกอร์). ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

AOAC. 1990. **Official Method Analysis**. 15th ed Association of Official Analysis Chemist, Washington D.C.

_____. 2000. **Official Method Analysis**. 17th ed. Association of Official Analysis Chemist, Washington D.C.

Boulton, C. and D. Quain. 2006. **Brewing Yeast and Fermentation**. Blackwell Science, Oxford, England.

- Day, M. and K. Shaw. 2001. Biological, Chemical, and Physical Processes of Compositing, pp. 17-22. In P.J. Stoffella and B.A. Kalm, ed. **Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems**. Lewes Pub. Washington D.C.
- Garcia-Gomaz, A., M.P. Bernal and A. Roig. 2002. Growth of ornamental plant in two composts prepared from agroindustrial wastes. **Bioresource Tech.** 83: 81-87.
- Guerra-Rodríguez, E., M. Vázquez and M. Díaz-Ravña. 2000. Co-composting of barley wastes and solid poultry manure. **Bioresource Tech.** 75: 223-225.
- _____, _____, J. Alonso, and M.J. Melgar. 2006. Evaluation of heavy metal contents in co-composts of poultry manure with barley wastes or chestnut burr/leaf litter. **Chemosphere.** 65: 1801-1805.
- Hamza, A. 1989. Utilization of Agro-industrial Residues in Alexandria: Experience and Prospects. **Biological Wastes.** 29: 107-121.
- Kale, G., R. Auras., S. P. Singh and R. Naraya. 2007. Biodegradability of polylactide bottle in real and simulated composting conditions. **Polymer Testing.** 26: 1049-1061.
- Kijchavengkul, T., R. Auras., M. Rubino and M. Ngouajio. 2006. Development of an automatic laboratory-scale respirometric system to measure polymer biodegradability. 25: 1006-1016.
- Lee, K-C., J-H. Her and S-K. Kwoon. 2008. Red clay composition reinforce with polymeric binders. **Construction and Building Material.** 22:2292-2298.
- Mbagwa, J.S.C and G.C. Ekwealor. 1990. Agronomic Potential of Brewer's Spent Grains. **Biological Waste.** 34: 336-347.

- Monhee, R., G.D. Unmar., A. Mudhoo and P. Khadoo. 2008. Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic condition. **Waste Management**. 28: 1624-1629.
- Montemurro, F., M. Diacono., C. Vitti and G. Debiase. 2009. Biodegradation of olive husk mixed with other agricultural wastes. **Bioresource Tech**. 100: 2969-2974.
- Mussato, S.I., G. Dragone and I.C. Roberto. 2006a. Brewer's Spent Grains: generation, Characteristic and potential application. **Cereal Science**. 43: 1-14.
- _____, _____ and G.J.M. Rocha. 2006b. Optimum operation conditions for brewer's spent grain soda pulping. **Carbohydrate Polymer**. 64: 22-28.
- _____, _____, M. Fernades, and I.M. Mancilha. 2007. Brewers' spent grain as raw material for lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii*. **Biotechnol Lett**. 29: 1973-1976.
- Oreopoulou, V. and W. Russ. 2007. **Utilization of by Products and Treatment of Waste in the Food Industry**. Dep. Food Science Human Nutrient University, Reykjavik, Iceland.
- Phokha, S., K. Duangaupama and K. Ruangsana. 2011. Plant Pot Production from the Leaves of Sugarcane. **Procedia Engineering**. 8: 135-137.
- Russ, W., H. Mörtel and R. Meyer-Pittroff. 2005. Application of spent grains to increase porosity in bricks. **Construction and Building Material**. 19: 117-126.
- Santos, M., J.J. Jiménez., B. Bartolomé., C. Gómez-Cordoves and M.J. del Nozal. 2003. Variability of brewer's spent grain within a brewery. **Food Chemistry**. 80: 17-21.
- Sasaki, H and T. Baba. 1998. The Application in Packaging industry, of bean curd refuse from Soybean Processed Food. **Packag. Technol. Sci**. 11: 251-264.

- Sørensen, G. and J. Hoffmann. 2004. Moisture-induced effects on stacking strength of Moulded-fiber Packaging in Varying Environmental Conditions. **Packag. Technol. Sci.** 17: 257-265.
- Ostos, J.C., R. López-Garrido., J.M. Murillo and López, R. 2008. Substitution of peat for municipal solid waste-and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects to on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. **Bioresource Tech.** 99: 1798-1800.
- Walkley, A and I. A. Blank. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science.** 37: 29-28.
- Wang, D., A. Sakoda and M. Suzuki. 2001. Biological efficiency and nutritional value of *Pleurotus ostreatus* cultivated on spent beer grain. **Bioresource Tech.** 78: 293-300.
- Yamauchi, M., S. Masuda and M. Kihara. 2006. Recycled pots using sweet potato distillation less. **Resources, Conservation and Recycling.** 47: 183-194.



ภาคผนวก



วิธีทดสอบความหนาของกระดาษ

1. มาตรฐานการทดสอบ TAPPI 411 om-89

2. อุปกรณ์

2.1 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper)

3. วิธีการทดสอบ

1. ทำการตัดกระดาษจากกากเบียร์ ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร จากนั้น นำแผ่นทดสอบมาตรฐานมาวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ครั้งละ 5 แผ่น แผ่นละ 8 จุด โดยแต่ละจุดไม่ซ้อนทับกัน และบันทึกค่าที่ได้ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

4. การคำนวณ

$$\text{ความหนาต่อหนึ่งแผ่นทดสอบ} = \frac{\text{ค่าความหนาที่วัดได้}}{5}$$

วิธีทดสอบปริมาณความชื้นของกระดาษ

1. มาตรฐานการทดสอบ TAPPI T412 om-88

2. อุปกรณ์และสารเคมี

- 2.1 เครื่องทดสอบปริมาณความชื้น
- 2.2 เครื่องชั่งแบบละเอียดชนิด 3 ตำแหน่ง
- 2.3 ภาชนะใส่ตัวอย่างที่กันความชื้นได้
- 2.4 ถุงมือ และกรรไกร
- 2.5 โถดูดความชื้น (desiccator)

3. วิธีการทดสอบ

- 3.1 นำตัวอย่างที่ทดสอบความชื้น จำนวน 5 ชุด ที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.0002 กรัม คัดน้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนอบ
- 3.2 นำขึ้นทดสอบพร้อมกับกระป๋องความชื้น ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 °C โดยนำขึ้นทดสอบมาวางไว้บนตะแกรงในเครื่องทดสอบความชื้น จนความชื้นคงที่
- 3.3 เมื่อความชื้นคงที่ นำขึ้นทดสอบใส่ในถุงพลาสติก แล้วนำออกจากเครื่องทดสอบความชื้นทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น (desiccator)
- 3.4 นำไปชั่งหาน้ำหนักของขึ้นทดสอบหลังอบ

4. การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนอบ} - \text{น้ำหนักขึ้นทดสอบหลังอบ}}{\text{น้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนอบ}} \times 100$$

วิธีทดสอบค่าความต้านทานแรงกดของกระดาษ

1. มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D642 และ Sørensen and Hoffmann (2004)

2. อุปกรณ์และสารเคมี

2.1 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกด

3. ชั้นทดสอบ

3.1 กระดาษ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 มิลลิเมตร สูง 85 มิลลิเมตร

4. วิธีการทดสอบ

4.1 วางกระดาษบนแผ่นเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกด

4.2 ทำการกดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง โดยใช้อัตราเร็วในการกด (compression rate) เท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อ นาที และบันทึกค่าแรงกดที่การเสียรูป 20 มิลลิเมตร

วิธีทดสอบความต้านทานการตกกระแทกของกระถาง

1. มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D 5276

2. อุปกรณ์และสารเคมี

2.1 เครื่องทดสอบความต้านทานการตกกระแทก

3. ชั้นทดสอบ

3.1 กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 มิลลิเมตร สูง 85 มิลลิเมตร

4. วิธีการทดสอบ

4.1 กำหนดความสูงของการตกกระแทก โดยปล่อยกระถางให้ตกกระแทก ณ ความสูงที่เพิ่มขึ้นทีละ 10 เซนติเมตร จนถึง 200 เซนติเมตร

4.2 ระบุตำแหน่งการตกกระแทก

4.2.1 การตกกระแทกเกิดที่ขอบก้นของกระถาง

4.2.2 การตกกระแทกด้านก้นของกระถาง

4.3 ตรวจสอบความเสียหายของชั้นทดสอบ

วิธีทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ

1. มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก TAPPI T441 om-90 และ Lee *et al.* (2008)

2. อุปกรณ์และสารเคมี

- 2.1 โอเอซิส (oasis)
- 2.2 เครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 2.3 นาฬิกาจับเวลา
- 2.4 กระดาษซับ
- 2.5 น้ำกลั่น

3. ภาวะทดสอบ

- 3.1 อุณหภูมิ 22 ± 3 °C
- 3.2 ความชื้นสัมพัทธ์ 82 ± 2 %

4. วิธีการทดสอบ

- 4.1 แช่โอเอซิส (oasis) ให้อิ่มตัวด้วยน้ำประมาณ 30 นาที
- 4.2 ชั่งชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดถึง 0.01 กรัม (W_1)
- 4.3 วางโอเอซิส (oasis) ลงบนชิ้นทดสอบ โดยใช้เวลาที่ทดสอบคือ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 นาที
- 4.4 นำชิ้นทดสอบมาซับน้ำออกด้วยกระดาษซับ
- 4.5 นำชิ้นทดสอบไปชั่งอีกครั้ง (W_2)

5. การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักของการดูดซึมน้ำ} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100$$

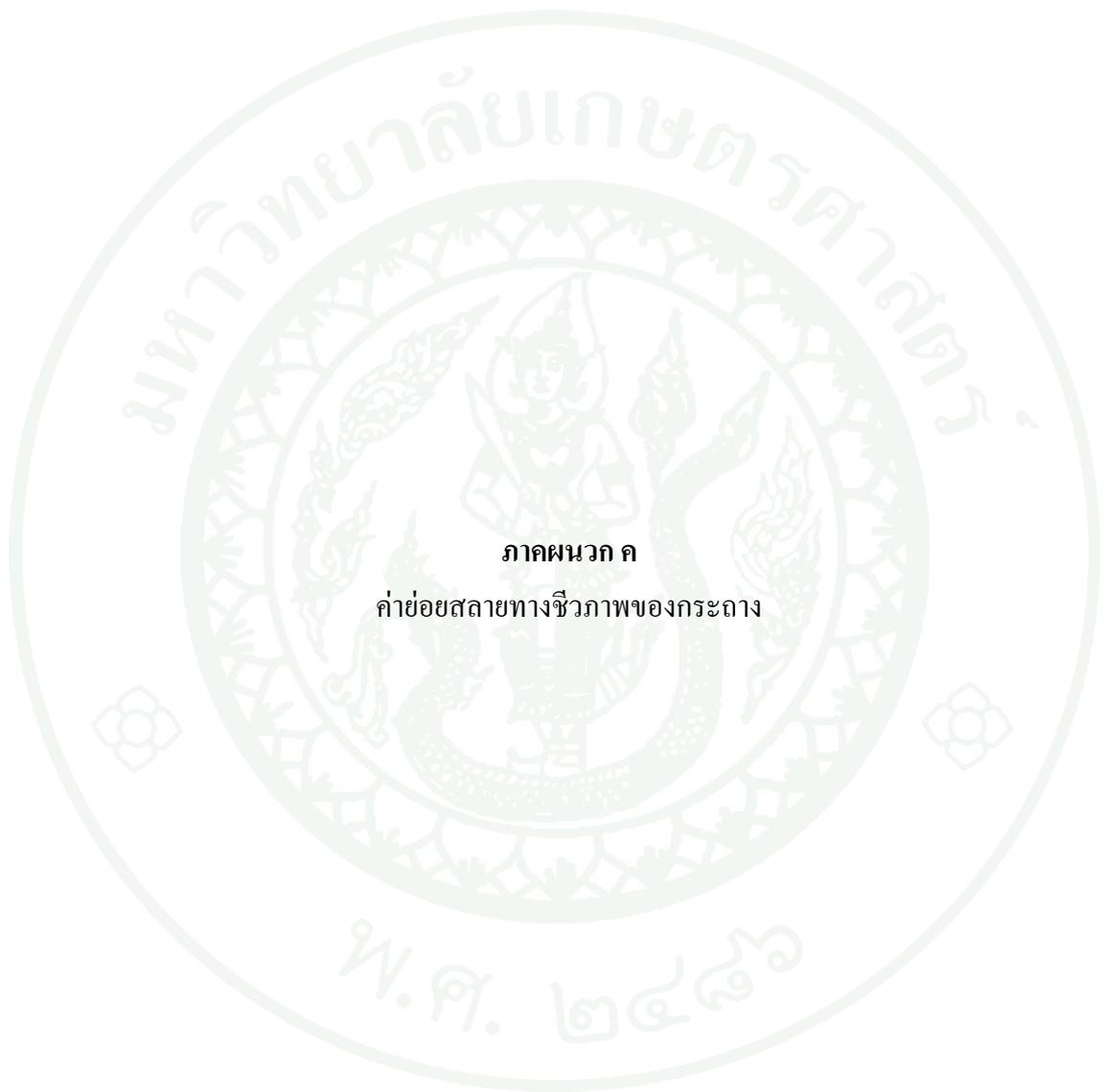


ภาคผนวก ข
ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทที่สามารถขึ้นรูปได้

ระยะเวลา การดูดซึมน้ำ (นาทึ)	ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระถาง (มิลลิลิตร)			
	T ₁₀	T ₁₂	T ₁₄	T ₁₆
10	1.626 ^c ±0.429	1.406 ^{bc} ±0.263	1.204 ^b ±0.105	0.570 ^a ±0.176
20	2.544 ^c ±0.550	2.222 ^c ±0.295	1.588 ^b ±0.154	0.916 ^a ±0.161
30	2.928 ^c ±0.544	2.580 ^c ±0.291	1.984 ^b ±0.206	1.172 ^a ±0.171
40	3.454 ^c ±0.634	3.044 ^c ±0.311	2.214 ^b ±0.179	1.408 ^a ±0.137
50	3.852 ^c ±0.631	3.414 ^c ±0.321	2.492 ^b ±0.161	1.642 ^a ±0.157
60	4.266 ^c ±0.624	3.834 ^c ±0.342	2.682 ^b ±0.184	1.796 ^a ±0.185
70	4.636 ^c ±0.593	4.234 ^c ±0.343	2.874 ^b ±0.195	1.982 ^a ±0.185
80	5.016 ^c ±0.595	4.616 ^c ±0.406	3.060 ^b ±0.190	2.182 ^a ±0.204
90	5.378 ^c ±0.510	4.976 ^c ±0.426	3.202 ^b ±0.222	2.366 ^a ±0.207
100	5.646 ^c ±0.563	5.272 ^c ±0.396	3.380 ^b ±0.227	2.572 ^a ±0.221
110	6.016 ^c ±0.561	5.662 ^c ±0.427	3.492 ^b ±0.212	2.750 ^a ±0.222
120	6.290 ^c ±0.578	5.960 ^c ±0.434	3.676 ^b ±0.207	2.934 ^a ±0.251
130	6.590 ^c ±0.548	6.258 ^c ±0.413	3.812 ^b ±0.216	3.078 ^a ±0.260
140	6.858 ^c ±0.541	6.548 ^c ±0.404	3.944 ^b ±0.261	3.250 ^a ±0.283
150	7.150 ^b ±0.510	7.050 ^b ±0.685	4.056 ^a ±0.227	3.436 ^a ±0.332

หมายเหตุ ^{a-c} อักษรที่มีความแตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดย
การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตารางผนวกที่ ค1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบไร้อินทรีย์
วัสดุตัวอย่าง ควบคุมมาตรฐานเชิงบวก และกระถางจากกากเปียร์ ดินเหนียว
กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

ระยะเวลา การย่อยสลาย (วัน)	อุณหภูมิในการย่อยสลาย (องศาเซลเซียส)			
	ไร้อินทรีย์ตัวอย่าง	ควบคุมมาตรฐาน เชิงบวก	กระถาง สูตรที่ T ₁₀	กระถาง สูตรที่ T ₁₄
0	34.33 ^b ±0.577	34.00 ^b ±1.732	30.67 ^a ±0.666	29.00 ^a ±1.000
3	33.3 ^a ±0.577	34.33 ^a ±1.527	34.33 ^a ±2.081	32.33 ^a ±0.577
5	31.67 ^{ab} ±0.577	31.67 ^{ab} ±0.577	30.67 ^a ±0.577	32.67 ^b ±0.577
7	32.67 ^{ab} ±1.154	34.33 ^b ±0.577	32.33 ^{ab} ±2.516	30.00 ^a ±0.000
14	30.33 ^a ±0.577	31.00 ^{ab} ±0.000	31.33 ^b ±0.577	31.00 ^{ab} ±0.000
21	31.33 ^a ±0.577	33.00 ^b ±1.000	32.33 ^{ab} ±0.577	32.33 ^{ab} ±0.577
28	35.67 ^b ±2.081	36.00 ^b ±1.000	35.00 ^b ±1.732	31.67 ^a ±0.577
35	33.00 ^a ±1.000	33.67 ^{ab} ±0.577	34.00 ^{ab} ±0.000	34.67 ^b ±0.577
45	30.00 ^a ±0.000	32.67 ^b ±0.000	33.00 ^b ±1.000	30.00 ^a ±0.000

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบ ไร่ขึ้นวัสดุตัวอย่าง ควบคุมมาตรฐานเชิงบวก และกระถางจากกากเป็ียร์ดินเหนียว กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

ระยะเวลา การย่อยสลาย (วัน)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัม)			
	ไร่ขึ้นวัสดุตัวอย่าง	ควบคุมมาตรฐาน เชิงบวก	กระถาง สูตรที่ T ₁₀	กระถาง สูตรที่ T ₁₄
0	0.818 ^a ±0.000	1.091 ^a ±0.472	1.091 ^a ±0.472	1.364 ^a ±0.472
3	1.636 ^a ±0.000	1.091 ^a ±0.472	1.364 ^a ±0.472	1.636 ^a ±0.000
5	1.636 ^a ±0.000	1.636 ^a ±0.000	2.182 ^b ±0.0472	1.636 ^a ±0.000
7	2.046 ^a ±0.409	2.319 ^a ±0.851	3.001 ^a ±0.472	2.728 ^a ±0.472
14	2.427 ^a ±0.472	2.509 ^a ±0.250	3.137 ^b ±0.170	3.164 ^b ±0.330
21	2.591 ^a ±0.450	2.701 ^a ±0.295	4.146 ^b ±0.263	3.682 ^b ±0.245
28	2.046 ^a ±0.455	2.591 ^a ±0.170	4.146 ^b ±0.526	3.901 ^b ±0.387
35	2.591 ^a ±0.250	2.701 ^a ±0.141	4.310 ^b ±0.419	3.955 ^b ±0.500
45	4.119 ^a ±0.125	4.201 ^a ±0.330	9.439 ^a ±6.365	7.229 ^a ±2.861

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ ๓3 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพจากถังทดสอบกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว
กลีเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตตตามสูตรส่วนผสมที่สามารถขึ้นรูปได้

ระยะเวลาการย่อยสลาย (วัน)	ร้อยละการย่อยสลาย	
	กระถางสูตรที่ T ₁₀	กระถางสูตรที่ T ₁₄
0	0.0013 ^a ±0.0011	0.0012 ^{ab} ±0.0000
3	0.0008 ^a ±0.0007	0.0008 ^a ±0.0003
5	0.0021 ^a ±0.0002	0.0012 ^{ab} ±0.0000
7	0.0032 ^a ±0.0010	0.0023 ^{abc} ±0.0014
14	0.0031 ^a ±0.0006	0.0025 ^{abc} ±0.0006
21	0.0041 ^a ±0.0006	0.0029 ^{bc} ±0.0003
28	0.0046 ^a ±0.0009	0.0034 ^c ±0.0005
35	0.0043 ^a ±0.0008	0.0031 ^c ±0.0005
45	0.0093 ^b ±0.0061	0.0056 ^d ±0.0023

หมายเหตุ ^{a-c} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตารางผนวกที่ ๑1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด – ด่างของดินก่อนและหลังการย่อยสลาย
ระยะเวลา 45 วันของจากกากเป็ียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิ
เตทตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T ₁₀	ก่อน	7.38 ^a ±0.180	7.38 ^a ±0.179
	หลัง	7.22 ^a ±0.180	7.18 ^a ±0.179
สูตรที่ T ₁₄	ก่อน	7.23 ^a ±0.068	7.26 ^a ±0.060
	หลัง	7.09 ^a ±0.227	7.09 ^a ±0.160

หมายเหตุ ^a อักษรที่มีเหมือนกันในแนวตั้งแสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ ๑2 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะ
เวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเป็ียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิ
เตทตามสูตร T₁₀ และ T₁₄ ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (เดซิซีเมนต่อเมตร)	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T ₁₀	ก่อน	0.366 ^a ±0.090	0.368 ^a ±0.095
	หลัง	0.422 ^a ±0.087	0.369 ^a ±0.030
สูตรที่ T ₁₄	ก่อน	0.352 ^a ±0.075	0.356 ^a ±0.074
	หลัง	0.419 ^a ±0.193	0.458 ^a ±0.215

หมายเหตุ ^a อักษรที่มีเหมือนกันในแนวตั้งแสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ 3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการย่อยสลาย
ระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ร้อยละปริมาณอินทรีย์วัตถุ	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T_{10}	ก่อน	1.835 ^a ±0.167	1.870 ^a ±0.122
	หลัง	2.155 ^{ab} ±0.198	2.110 ^{ab} ±0.198
สูตรที่ T_{14}	ก่อน	2.106 ^{ab} ±0.117	2.018 ^{ab} ±0.158
	หลัง	2.276 ^b ±0.254	2.303 ^b ±0.244

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการย่อยสลาย
ระยะเวลา 45 วัน กระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ร้อยละปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T_{10}	ก่อน	0.040 ^a ±0.005	0.044 ^a ±0.010
	หลัง	0.092 ^b ±0.007	0.092 ^b ±0.003
สูตรที่ T_{14}	ก่อน	0.036 ^a ±0.013	0.040 ^a ±0.011
	หลัง	0.105 ^b ±0.010	0.104 ^b ±0.013

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเปียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ร้อยละปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T_{10}	ก่อน	0.538 ^a ±0.307	0.542 ^a ±0.324
	หลัง	0.479 ^a ±0.269	0.450 ^a ±0.194
สูตรที่ T_{14}	ก่อน	0.275 ^a ±0.066	0.250 ^a ±0.060
	หลัง	0.210 ^a ±0.049	0.225 ^a ±0.021

หมายเหตุ ^a อักษรที่มีเหมือนกันในแนวตั้งแสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก่อนและหลังการย่อยสลายระยะเวลา 45 วัน ของกระถางจากกากเปียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตทตามสูตร T_{10} และ T_{14} ณ บริเวณแตกต่างกันรอบกระถาง

สูตร	การย่อยสลาย	ร้อยละปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	
		บริเวณ 2 เซนติเมตร	บริเวณ 5 เซนติเมตร
กระถาง	45 วัน		
สูตรที่ T_{10}	ก่อน	0.026 ^b ±0.005	0.027 ^b ±0.004
	หลัง	0.015 ^a ±0.003	0.014 ^a ±0.002
สูตรที่ T_{14}	ก่อน	0.023 ^b ±0.002	0.024 ^b ±0.002
	หลัง	0.012 ^a ±0.001	0.010 ^a ±0.001

หมายเหตุ ^{a-b} อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ลักษณะของส่วนผสมและขี้รูปกระถาง

1. กากเบียร์



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑1 กากเบียร์ (ก) ตอนเปียก (ข) ตอนแห้ง

2. ลักษณะของส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑2 ลักษณะของส่วนผสมของกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท

(ก) ส่วนผสมไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

(ข) ส่วนผสมสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

3. สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางที่สมบูรณ์ได้



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)



(จ)

(ฉ)

(ช)

(ซ)

ภาพผนวกที่ 33 สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางได้ (ก) สูตรที่ 2 (ข) สูตรที่ 4 (ค) สูตรที่ 6 (ง) สูตรที่ 8 (จ) สูตรที่ 9 (ฉ) สูตรที่ 11 (ช) สูตรที่ 13 (ซ) สูตรที่ 15

4. สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นกระถางได้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพผนวกที่ ๔ สูตรส่วนผสมจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นกระถางได้ (ก) สูตรที่ 10 (ข) สูตรที่ 12 (ค) สูตรที่ 14 (ง) สูตรที่ 16



การทดสอบความสามารถการย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษ

1. การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ตามสูตร T_{10} และ T_{14}



- ภาพผนวกที่ ๑1 การย่อยสลายทางชีวภาพของกระดาษจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลิเซอรอล และพอลิไวนิลอะซิเตท และที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยระบบ cumulative measurement respirometric (CMR)

2. ลักษณะของการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางจากกากเบียร์ ดินเหนียว กลีเซอร์รอล และพอลิไวนิลอะซิเตท ที่สามารถขึ้นรูปได้



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓2 ลักษณะของกระถางสูตรที่ 10 (ก) ก่อนการย่อยสลาย (ข) หลังการย่อยสลาย
ระยะเวลา 45 วัน



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓3 ลักษณะของกระถางสูตรที่ 14 (ก) ก่อนการย่อยสลาย (ข) หลังการย่อยสลาย
ระยะเวลา 45 วัน

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิตววรรณ เครือคำ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	30 สิงหาคม 2525
สถานที่เกิด	อำเภอภูผินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	มูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์ พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว และสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี (2554) ทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2555)